



universität  
wien

# Diplomarbeit

## **Beeinflusst das bodennahe Ozon die Lufttemperatur: Statistische Analyse ausgewählter Messstellen im Großraum Wien**

Verfasserin

Rita Sturmlechner

angestrebter akademischer Grad

Magistra der Naturwissenschaften (Mag.rer.nat.)

Wien, Oktober 2011

Matrikelnummer: 0309997

Studienkennzahl: 453

Studienrichtung: Diplomstudium Theoretische und Angewandte Geographie

Betreuer: Ao.Univ.Prof. Dr.rer.nat. Mag.rer.nat. Philipp Weihs



## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Wien, Oktober 2011

Unterschrift





## **Vorwort**

Diese Diplomarbeit stellt den Abschluss meines Studiums „Theoretische und Angewandte Geographie“ an der Universität Wien dar. Anlass dafür war das Thema einer Seminararbeit, wobei ich bei der Recherche auf eine interessante kanadische Studie gestoßen bin, welche sich mit dem Thema „Einfluss des troposphärischen Ozons auf die Temperatur in Toronto“ befasst. Diese Untersuchung von Beaney und Gough 2002 soll für diese Arbeit als Vorlage dienen, wobei versucht wird die kanadische Methode auf die Region Wien anzuwenden.

An dieser Stelle möchte ich meinem Professor Ass.-Prof. Dr. Franz Holawe danken, welcher mich in diesem Seminar sowie während meiner ganzen Studienzeit unterstützt und stets versucht hat, das Beste aus mir heraus zu holen. Außerdem hat er mich mit meinem Diplomarbeitsbetreuer Ao.Univ.Prof. Dr. Mag. Philipp Weihs bekannt gemacht, welchem ich für die unterstützende Begleitung seit Beginn meiner Diplomarbeit ebenfalls zu Dank verpflichtet bin.

Neben diesen Professoren möchte ich auch noch meinem ehemaligen Tutor Dr. Harald Rieder danken. Er hat mir besonders mit der Datenaufbereitung geholfen. Außerdem wurde er im Laufe der Jahre ein guter Freund.

Auch meinen Studienkollegen und Freunden danke ich, welche mir all die Jahre zur Seite standen und mein Studium zu einer schönen und unvergesslichen Zeit machten.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern Franz und Christiana sowie meiner Familie, die mich meine gesamte schulische Ausbildung begleiteten und mir mein Studium in Wien finanzierten. Außerdem standen sie mir stets mit gutem Rat zur Seite und versuchten mich bestens zu fördern.



## Zusammenfassung

Analog zu einer kanadischen Studie von Beaney und Gough aus dem Jahr 2002 [4], sollte in dieser Arbeit der anthropogene Einfluss, vor allem des bodennahen Ozons, auf die Temperatur der bodennahen Luft analysiert werden. Untersucht wurden neun Stationen im Großraum Wien von denen 10 Jahre Ozonmessungen und 4 bis 10 Jahre Temperaturmessungen zur Verfügung standen. Für die Analyse wurden Werktagstagesgänge mit Wochenendtagesgängen von Wochen mit hohen Ozonwerten und Wochen mit normalen Ozonwerten verglichen und auf ihre Signifikanz geprüft. Der Schwellenwert für die Einteilung in Ereigniswochen und normale Wochen wurde variabel gewählt.

Die Ergebnisse zeigen, dass an den Wochentagen der Ereigniswochen sowohl die Ozonkonzentration als auch die Tagesamplitude größer sind als an den Wochenenden. Außerdem konnte ein Zusammenhang mit dem variablen Schwellenwert erkannt werden. Auch die Signifikanzen der Unterschiede der Ozonwerktagswerte zu den Ozonwochenendwerten zeigten mit höherem Schwellenwert einen Trend zur Signifikanz in Ereigniswochen, in normalen Wochen war kein Trend der p-Werte des  $t$ -Tests feststellbar. Signifikante Unterschiede gab es bei Ozon lediglich in Ereigniswochen an drei Stationen mit bestimmten Schwellenwerten. Aufgrund der Ergebnisse kann man auf anthropogenen Einfluss schließen. Die Temperaturtagesgänge ähneln nur teilweise ihrem Ozonpendant. Die Signifikanzen in Ereigniswochen weisen hingegen mit steigendem Schwellenwert den selben Trend auf wie die Ozonsignifikanzen, in normalen Wochen ist bei den Temperatursignifikanzen allerdings ebenfalls ein Trend erkennbar, jedoch in umgekehrter Richtung als in Ereigniswochen. Anthropogener Einfluss ist auch an den Temperaturdaten erkennbar, da auch bei den Temperaturtagesgängen an Werktagen die Amplitude größer ist als an den Wochenenden, besonders in Ereigniswochen. Ein konkreter Zusammenhang des bodennahen Ozons mit der Temperatur ist allerdings nicht erkennbar. Auch weitere Analysen konnten einen anthropogenen Einfluss, allerdings keinen konkreten Zusammenhang von Ozon und Temperatur feststellen. Vermutlich sind hier andere Parameter des Strahlungsantriebes, wie zum Beispiel Aerosole, Bewölkung, etc., ausschlaggebender.

## Abstract

In order to estimate anthropogenic influence, especially that of tropospheric ozone, on radiative forcing weekday/weekend diurnal variations of ozone and temperature were compared. 10-year-ozone data and 4- to 10-year-temperature data from nine locations in the greater Vienna area were used for this analysis. In accordance with Beaney and Gough (2002) [4] the data were separated in exceedance and non-exceedance weeks, weeks with high and normal ozone values respectively. Different thresholds were applied for the analysis.

The results of the ozone diurnal variations show that exceedance weeks have higher ozone amplitudes than non-exceedance weeks. Additionally, a relation between the results and the used threshold was found. Higher thresholds show a trend to a higher amplitude. Moreover in exceedance weeks the p-value approaches significance. During non-exceedance weeks no trend of significances was found. However, just a few stations at certain thresholds and only in exceedance weeks show significant weekday/weekend variations. The results suggest anthropogenic influence. Temperature diurnal variations are only in some cases similar to the ozone ones. In conformity with the ozone significances, temperature significances show the same trend in exceedance weeks, with p-values approaching significance, when the threshold increases. Non-exceedance weeks present the opposite trend, with higher thresholds veering away from the level of significance. However, the temperature data show anthropogenic influence as well, as can be seen by higher amplitudes during exceedance weeks on workdays. A direct relation between ozone and temperature was not found. Further studies should be made to analyse the anthropogenic influence. It is possible that other parameters of radiative forcing, such as aerosols or cloudiness, could be responsible for the effects described above.

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort . . . . .	III
Zusammenfassung . . . . .	V
Abstract . . . . .	VI
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Physikalische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Das elektromagnetische Spektrum . . . . .	3
2.2 Die Atmosphäre . . . . .	4
2.2.1 Aufbau der Atmosphäre . . . . .	4
2.2.2 Zusammensetzung der Atmosphäre . . . . .	4
2.3 Strahlung und Materie . . . . .	5
2.3.1 Reflexion (Albedo) . . . . .	6
2.3.2 Streuung . . . . .	6
2.3.3 Absorption . . . . .	8
2.3.4 Emission . . . . .	9
2.4 Strahlungshaushalt der Erde . . . . .	10
2.4.1 Energiebilanzgrößen eines Standortes . . . . .	14
<b>3 Chemische Grundlagen</b>	<b>25</b>
3.1 Luftschadstoffe . . . . .	25
3.1.1 Ozon . . . . .	25
<b>4 Hypothesenbildung</b>	<b>30</b>
<b>5 Analyse</b>	<b>32</b>
5.1 Untersuchungsgebiet . . . . .	32
5.1.1 Forsthof . . . . .	32
5.1.2 Gänserndorf . . . . .	34
5.1.3 Hainburg . . . . .	34
5.1.4 Illmitz . . . . .	35
5.1.5 Mistelbach . . . . .	35
5.1.6 Pillersdorf . . . . .	36
5.1.7 Schwechat . . . . .	36
5.1.8 Stockerau . . . . .	37
5.1.9 Wiener Neustadt . . . . .	38
5.2 Methodik . . . . .	38
5.3 Ergebnisse und Diskussion . . . . .	40
5.3.1 Ozondaten . . . . .	55
5.3.2 Temperaturdaten . . . . .	63
5.4 Zusammenfassung und Diskussion . . . . .	74
<b>Literatur</b>	<b>83</b>

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>87</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>90</b>

# 1 Einleitung

In den letzten Jahren gab es weltweit und auch in Österreich viel Diskussion um den Klimawandel. Durch die verstärkte Emission von Gasen wurde der natürliche Treibhauseffekt vom Menschen beeinflusst und verstärkt. Hier rückte vor allem das Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) in den Mittelpunkt der Diskussionen. Dieses Treibhausgas wird durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe anthropogen erzeugt. Weitere wichtige anthropogene Treibhausgase sind in Abschnitt 2.4.1 beschrieben. In dieser Arbeit soll der Fokus besonders auf den Schadstoff Ozon ( $\text{O}_3$ ) in Bodennähe gelegt werden, welcher ebenfalls klimawirksam ist [8].

Schadstoffe werden vor allem in Stadtgebieten – Ballungsräumen und Industriezentren – ausgestoßen. Hier spielen besonders lokale Gegebenheiten eine große Rolle. So unterschiedlich diese Regionen in ihrer Ausprägung sind, so unterschiedlich sind auch die dort ausgestoßenen Schadstoffe. Dementsprechend kommt es auch zu Änderungen der lokalen Luftqualität und des lokalen Klimas. Besonders wichtig ist es in diesem Zusammenhang, die Beziehungen zwischen den Schadstoffen und der Temperatur zu untersuchen und zu verstehen [4].

Ozon ist ein sehr wichtiges Produkt der Photochemie in Stadtgebieten, vor allem in den Sommermonaten [14, 10]. Es ist ein sekundärer Schadstoff, das heißt, er wird aus direkt emittierten Schadstoffen gebildet (siehe Abschnitt 3.1.1). Daher könnte ein Anstieg der zu Ozon führenden Substanzen auch einen Anstieg des bodennahen Ozons mit sich bringen [14]. Die Ozonkonzentration eines Standortes ist von der Bildungs- und Abbaurate von  $\text{O}_3$  abhängig, vor allem durch photochemische Reaktionen von primären Schadstoffen, den so genannten Precursoren <sup>1</sup> (siehe Abschnitt 3.1.1), sowie dem lokalen Hintergrundwert [25, 31, 2]. In Stadtgebieten findet man die höchsten Emissionswerte dieser Precursoren, welche hauptsächlich vom Verkehr emittiert werden [2], auf Grund dessen diese anthropogenen Emissionen häufig einen Wochenzyklus aufweisen [31], was nahe liegen lässt, dass auch Ozon einem Wochenzyklus folgt. Diese Tatsache wurde bereits in den 1970er Jahren in den USA das erste Mal erkannt. Inzwischen gibt es viele Studien, die den „Weekend-Effekt“, das Vorfinden höherer  $\text{O}_3$ -Konzentrationen an Wochenenden, trotz geringerer Precursor-Emissionen bestätigen können (z.B. Levitt and Chock 1976, Elkus and Wilson, 1977, Karl 1978; zitiert nach [2], [9, 31, 36, 24, 2]).

In den Sommermonaten kommt es durch das verstärkte Angebot an Sonnenenergie häufig zu hohen Ozonepisoden. Das Zustandekommen dieser Ozonepisoden ist sehr schwierig zu verstehen, da die primären Schadstoffe nicht genau lokalisierbar sind, die globale  $\text{O}_3$ -Hintergrundkonzentration nicht zu vernachlässigen und auch die Reaktionsrate von vielen Faktoren wie zum Beispiel Strahlung und Temperatur abhängig ist [9]. Daher spielen auch die meteorologischen Verhältnisse neben den Emissionen eine wichtige Rolle [9, 25, 31, 14]. Förderlich für hohe Ozonwerte sind Hochdruckwetterlagen, welche mit Emissionen und Ozon aus anderen Gebieten bereits angereichert wurden [31]. Diese

---

<sup>1</sup>primäre Emissionen, welche zur Bildung eines sekundären Schadstoffes führen, in diesem Fall zur Ozonbildung;

Prozesse zu verstehen ist besonders für Kontrollstrategien wichtig [36, 24, 25].

Es ist klar, dass lokale Temperatur bzw. Strahlung einen großen Einfluss auf Ozon hat, einerseits auf Grund der photochemischen Reaktion von Sauerstoff mit Strahlung, was die Ozonbildung erlaubt (siehe Abschnitt 3.1.1), andererseits laufen unter höheren Temperaturen chemische Reaktionen, also auch die Ozonbildung, schneller ab [55]. Man weiß auch, dass Ozon ein klimawirksames Gas ist. Wie die lokale Ozonkonzentration genau auf den Strahlungshaushalt wirkt, ist allerdings noch unklar. In diesem Zusammenhang ist es wichtig eine passende Methode für diese Untersuchung zu finden.

Beaney und Gough haben 2002 eine Studie veröffentlicht – „The influence of tropospheric ozone on the air temperature of the city of Toronto, Ontario, Canada“ – in der sie genau das versuchen. Sie gehen davon aus, dass es kein natürliches meteorologisches Phänomen gibt, das einem 7-Tageszyklus folgt und versuchen daher die Unterschiede der Werktags- und Wochenendtemperaturwerten auf das bodennahe Ozon zurückzuführen. Um den Zusammenhang zwischen Ozon und Temperatur zu verdeutlichen, teilen sie außerdem ihren Datensatz in Episoden mit hohen und normalen Ozonwerten auf. Beaney und Gough verzeichneten dabei in Ereigniswochen signifikante Unterschiede der Werktags- und Wochenendwerte, sowohl bei Ozon als auch bei der Temperatur. Als Schlussfolgerung sagen sie, die Temperaturunterschiede seien eindeutig auf anthropogene Einflüsse, unter anderem das bodennahe Ozon, zurückzuführen [4].

Diese Studie galt als Vorlage für diese Arbeit. Daher wird auch hier versucht über die Unterschiede von Werktagen und Wochenenden von Ozon und Temperatur die Fragestellungen des Einflusses des bodennahen Ozons auf die Temperatur zu lösen. Dabei werden analog zu Beaney und Gough (2002) die mittleren Tagesgänge dieser beiden Größen erstellt und analysiert sowie zwischen hohen und normalen Ozonepisoden unterschieden (siehe 5.2).



## 2 Physikalische Grundlagen

### 2.1 Das elektromagnetische Spektrum

Die von der Sonne ausgesendete Strahlung, elektromagnetische Wellen, kann man nach ihrer Wellenlänge und Frequenz in verschiedene Bereiche einteilen (Abbildung 1). Die einzelnen Bereiche des elektromagnetischen Spektrums überschneiden sich teilweise (Abbildung 1). So bezeichnet man elektromagnetische Wellen mit einer Wellenlänge kleiner als 0,1 nm als Röntgenstrahlung, entstehen diese allerdings durch Kernzerfall, nennt man sie Gammastrahlung. Der für das menschliche Auge wahrnehmbare Bereich liegt etwa von 400 bis 700 nm, das sichtbare Licht. Am kurzwelligen Ende schließt die Ultraviolett- oder UV-Strahlung an, am langwelligen Ende die Infrarot- oder IR-Strahlung. Die von Körpern emittierte Wärmestrahlung liegt bei gewöhnlichen Temperaturen im Infrarotbereich [52].

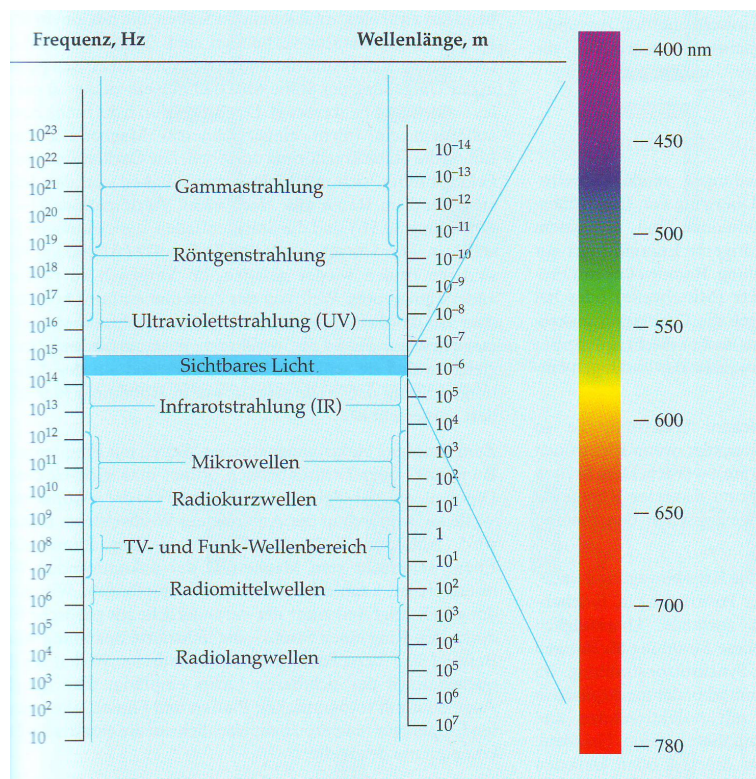


Abbildung 1: Das elektromagnetische Spektrum [52]

## 2.2 Die Atmosphäre

### 2.2.1 Aufbau der Atmosphäre

In der Literatur gibt es verschiedene Methoden, die Atmosphäre in unterschiedliche Schichten zu unterteilen, zum Beispiel die Einteilung nach der Durchmischung der Atmosphäre oder nach ihrer Ionisierung, Reibung oder Temperatur [45]. Die häufigste davon ist die Atmosphäre nach dem Temperaturprofil zu gliedern (Abbildung 2). Demnach ist die unterste Schicht die Troposphäre, in der es eine stetige Temperaturabnahme mit der Höhe gibt. Hier ist die Atmosphäre durch die vorherrschende Konvektion sehr gut durchmischt. Diese Schicht reicht bis zur Tropopause, welche den Übergang in die Stratosphäre, in der die Temperatur mit der Höhe bis zur Stratopause zunimmt, beschreibt. Aufgrund der dort vorherrschenden Ozonschicht, wird in der Höhe von 15 bis 25 km UV-Licht absorbiert, was einen Anstieg der Temperatur mit sich bringt [1]. Angrenzend an diese Atmosphärenschicht befindet sich die Mesosphäre. Hier kommt es wieder zu einer Temperaturabnahme mit der Höhe bis hin zur Mesopause, wo die Temperatur der Atmosphäre ihr Minimum erreicht. Danach kommt es erneut zu einem Temperaturanstieg [54].

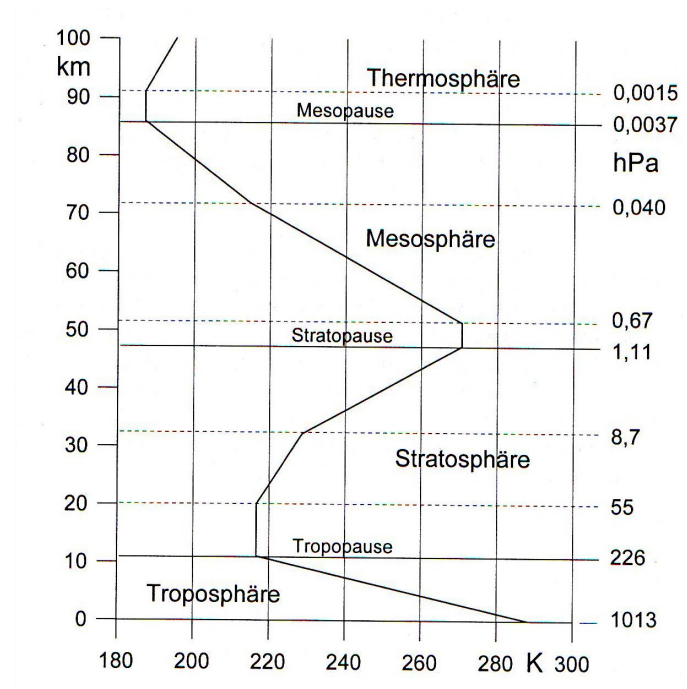


Abbildung 2: Der vertikale Aufbau der Atmosphäre [34]

### 2.2.2 Zusammensetzung der Atmosphäre

Die Atmosphäre ist ein Gasgemisch und besteht zu 78,08 %vol aus Stickstoff, zu 20,95 %vol aus Sauerstoff, zu 0,94 %vol aus Argon und etwa zu 0,04 %vol aus Kohlendioxid.

Weitere Bestandteile sind andere Spurengase wie zum Beispiel Ammoniak, alle Edelgase, Fluor, Jod, Kohlenmonoxid, Methan, Ozon, Schwefeldioxid, Stickoxide, Wasserstoff und Wasserdampf [28]. Alle diese Elemente beeinflussen durch ihre spezifischen Eigenschaften, wie sie mit Strahlung interagieren, das Klima der Erde. Auch andere Bestandteile befinden sich in der Atmosphäre und üben einen Einfluss aus wie zum Beispiel Aerosole oder auch Wolken.

## 2.3 Strahlung und Materie

In der Atmosphäre kommt es zu drei Prozessen, welche die solare Strahlung beeinflussen, Absorption ( $\alpha$ ), Reflexion ( $\rho$ ) und Streuung ( $\tau$ ) [11]. Dabei trifft Strahlung auf Materie in der Atmosphäre und wird dabei absorbiert, reflektiert oder gestreut:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (1)$$

Diese einzelne Aufteilung der Prozesse kann je nach Wellenlänge der Strahlung sehr verschieden sein [6]. Alle drei Prozesse sind am globalen Strahlungshaushalt beteiligt und beeinflussen die Temperatur der Erde (siehe Kapitel 2.4). Außerdem verhindern sie dadurch, dass die gesamte Strahlung, welche auf die Obergrenze der Atmosphäre auftrifft, bis auf die Erdoberfläche durchdringt. Abbildung 3 zeigt die Differenz der Strahlung an der Atmosphärenengrenze zu der auf Meeresspiegelniveau, verglichen mit der Strahlung eines schwarzen Körpers [30].

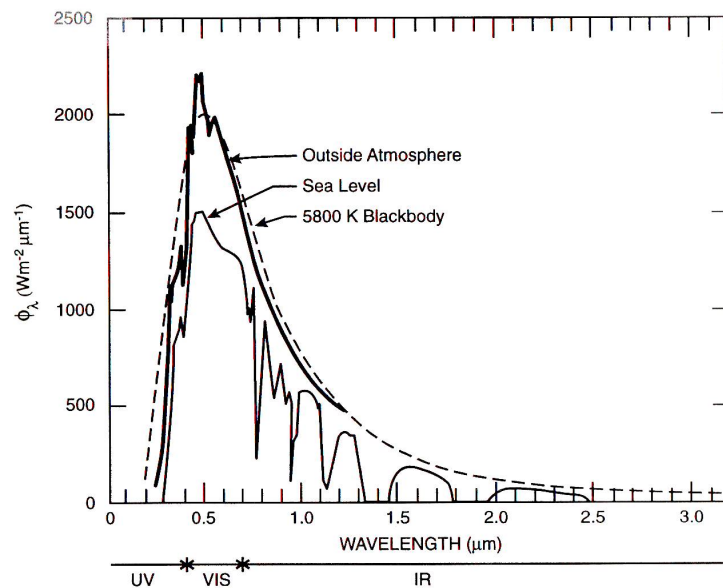


Abbildung 3: Das solare Strahlungsspektrum, gemessen an der Obergrenze der Erdatmosphäre (fett) und auf Meeresspiegelniveau [30]

### 2.3.1 Reflexion (Albedo)

Bei der Reflexion kommt es zu einem Zurückwerfen der einfallenden Strahlung zurück in Richtung Weltall (Abbildung 4). Der Prozess der Reflexion findet sowohl in der Atmosphäre durch verschiedene Partikel und Gase oder Wolken als auch direkt auf der Erdoberfläche statt. Die so genannte Albedo kann sehr unterschiedliche Werte annehmen. Es kommt dabei zum Beispiel auf die Wolkendicke, die vorherrschende Vegetation, Bodenfeuchtigkeit, das Alter und den Zustand des Schnees oder Eises und den Einfallswinkel der Sonne an. In den meisten Fällen wird daher nicht die gesamte Strahlung, sondern nur ein Prozentsatz reflektiert (Tabelle 1). So haben Wolken einen Durchschnittswert von 45%. Regenwolken in den unteren Atmosphärenschichten können zwischen 25 und 84% aufweisen, was oft den großen Unterschied zwischen der einfallenden Strahlung in den oberen Atmosphärenschichten und der ankommenden Strahlung auf der Erdoberfläche erklärt. Die genauen Werte für die verschiedenen Wolkenarten sind allerdings nicht bekannt. Dieser Aspekt könnte im Bezug auf die globale Erwärmung und der möglichen resultierenden Änderung der Wolkendecke sehr interessant sein. Auch Vegetationstypen weisen sehr unterschiedliche Werte auf. So kommt es bei einem Eukalyptuswald vor, dass bloß 5% reflektiert werden, bei Grasland hingegen bis zu 22%. Auch das ist im Bezug auf Landnutzungsänderungen ein sehr wichtiger Aspekt, vor allem auf regionaler Basis. So kann es durch großräumige Abholzung, also den Übergang von Wald zu Grasland, zu einer erhöhten Albedo und somit einem Rückgang der Temperatur kommen. Änderungen im Wasserhaushalt, ausgelöst durch Dürren oder Regenzeiten, resultieren ebenfalls in einer Änderung des Mikroklimas. Schnee- und Eislandschaften haben die höchsten Albedowerte. Änderungen der durchschnittlichen Schneefallmengen im Winter können ebenfalls einen Temperaturrückgang bzw. -anstieg mit sich bringen. Für den Albedowert des Wassers ist vor allem der Einfallswinkel der Strahlung ausschlaggebend. Tabelle 1 zeigt, dass der Wert zwischen 4 und 60% variieren kann. Insgesamt beträgt die globale durchschnittliche planetare Albedo etwa 31% [11].

### 2.3.2 Streuung

Der zweite Prozess, der Einfluss auf die einfallende Strahlung in der Atmosphäre hat, ist die Streuung. Sie beeinflusst kurzwellige Strahlung und führt zu einer Interferenz sowie zur Beugung der Wellen (Abbildung 4). Streuung wird durch Gasmoleküle oder Partikel wie Staub oder Luftschadstoffe ausgelöst und lenkt die Strahlung auf ihrem Weg durch die Atmosphäre ab. Global gesehen werden ca. 18% der einfallenden Strahlung, etwa 7% nach oben und 11% nach unten, in der Atmosphäre gestreut. Die Richtung der Ablenkung hängt einerseits von der Größe der Moleküle und andererseits von der Wellenlänge der einfallenden Strahlung ab. Die langwellige Strahlung, welche von der Erde in die Atmosphäre abgegeben wird, hat eine zu große Wellenlänge um gestreut zu werden. Sehr kurzwellige Wellenlängen werden vorrangig von Gasmolekülen gestreut. Daher kommt es auch zur „Blaufärbung“ des Himmels, da bei hochstehender Sonne, also einem hohen Einstrahlungswinkel, beinahe das ganze blaue Licht gestreut wird, was den Himmel blau erscheinen lässt. Bei Sonnenuntergang wirkt der Himmel mehr rötlich und

Tabelle 1: Albedowerte verschiedener Oberflächen [11]

<i><b>Oberfläche</b></i>	<i><b>Albedo (%)</b></i>
<b>Wolken:</b>	
< 150 m Dicke	25–63
mit 150–300 m Dicke	45–75
mit 300–450 m Dicke	59–84
Cirruswolken	2–3
Schönwetter-Kumuluswolken	30
dicke Kumulusnimbuswolken	90
Durchschnittswert	45
<b>Bodenoberflächen:</b>	
Asphalt	5–10
Beton	17–27
Sand	30–60
dunkle Erde	5–15
helle, trockene Erde	25–30
feuchte Erde	14–17
frischer Schnee	75–90
alter Schnee	45–70
<b>Vegetation:</b>	
Nadelwald	4–18
Laubwald	8–23
tropischer Regenwald	4–18
Grasland	5–25
grüne Feldfrüchte	5–25
Tundra	15–35
<b>Wasseroberflächen:</b>	
mit Einstrahlungswinkel 3°	60
mit Einstrahlungswinkel 10°	38
mit Einstrahlungswinkel 25°	9
mit Einstrahlungswinkel 90°	4
frisches Eis	>90

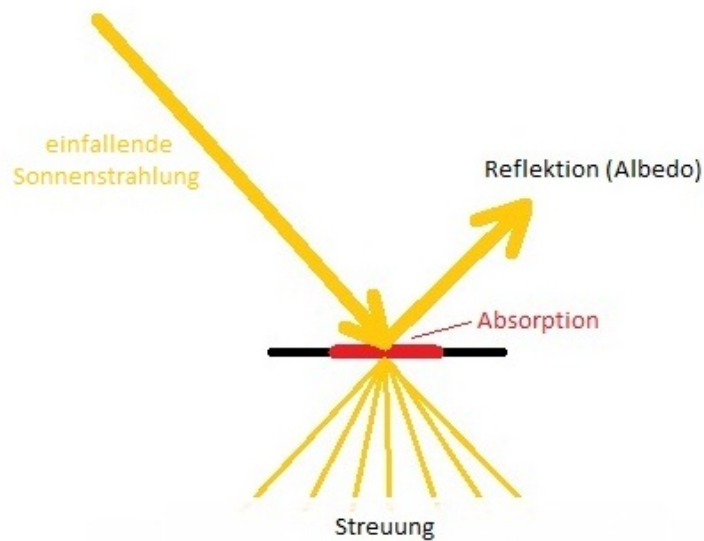


Abb. 4: Die 3 Prozesse der Strahlungsbeeinflussung [eigene Darstellung]

violett. Staubpartikel, Rauch oder Eiskristalle sind größer als Gasmoleküle und können daher alle Wellenlängen des sichtbaren Lichts streuen, was eine „weiße Färbung“ des Himmels bewirkt - ein Zeichen für Luftverschmutzung [11].

### 2.3.3 Absorption

Beim dritten Prozess der Strahlungsbeeinflussung in der Atmosphäre, der Absorption, kommt es zur Aufnahme der Strahlung durch ein Gasmolekül oder ein Partikel [11]. Beim Absorptionsvorgang wird die elektromagnetische Energie der Strahlung vom Molekül aufgenommen und in kinetische Energie (Wärme) und Schwingungsenergie (Anregung) der Moleküle umgewandelt, das Molekül erhitzt sich [6].

Ein großer Teil der elektromagnetischen Strahlung wird durch die Atmosphäregase absorbiert (Abbildung 3 und 5). Treibhausgase nehmen dabei eine wichtige Rolle ein, vor allem im langwelligen Bereich, wobei jedes Gas seine eigenen Absorptionseigenschaften mit sich bringt. Ozon ( $O_3$ ) und molekularer Sauerstoff ( $O_2$ ) absorbieren vor allem im kurzwelligen Bereich ( $<0,29 \mu m$ ) die einfallende Strahlung. Daher ist auch die Ozonschicht von fundamentaler Bedeutung, da diese die schädliche UV-Strahlung aufnimmt und damit das Auftreffen auf die Erdoberfläche verhindert. Ozon hat außerdem noch Absorptionsbanden im langwelligen Bereich von 9 bis  $9,7 \mu m$ , es ist also auch ein Treibhausgas. Wasserdampf ( $H_2O$ ) hat ebenfalls viele Absorptionsbanden, wobei am wichtigsten hierbei der langwellige Bereich ( $>15 \mu m$ ) ist, welcher völlig durch  $H_2O$  abgedeckt wird (vgl. Abbildung 5). Die Sauerstoffverbindungen  $O_3$  und  $O_2$  absorbieren gemeinsam etwa 2% der einfallenden Sonnenstrahlung, Wasserdampf hingegen sogar 15% der abgehenden langwelligen und auch Anteile der einfallenden kurzwelligen Strahlung. Wasserdampf ist

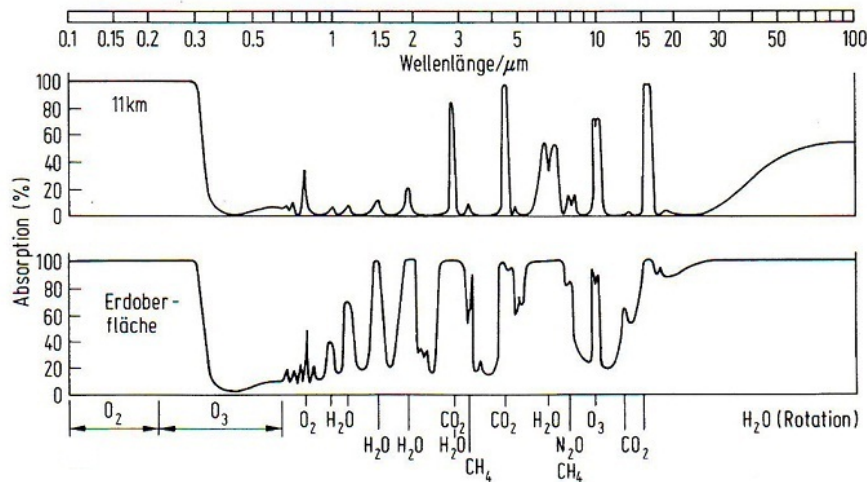


Abbildung 5: Die Absorption des solaren Spektrums in 11km Höhe (oben) und an der Erdoberfläche (unten) [6]

also ein sehr starker Absorber. Andere Spurengase in der Atmosphäre weisen wenige spezielle Absorptionsbanden auf und sind daher bei diesen Wellenlängen die dominanten Absorber. Kohlendioxid zum Beispiel hat vor allem im Bereich zwischen 13 und 17  $\mu\text{m}$  seine stärksten Absorptionseigenschaften. Außerdem hat es noch Absorptionsbanden im Bereich von 2 und 4  $\mu\text{m}$ . Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Stickstoffoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ ) haben einen ähnlichen Absorptionsbereich zwischen 4 und 10  $\mu\text{m}$ , dominant sind  $\text{CH}_4$  und  $\text{N}_2\text{O}$ , allerdings in einem Bereich zwischen 7 und 8  $\mu\text{m}$  [11].

In Abbildung 5 sieht man den Unterschied der Absorption des solaren Spektrums zwischen verschiedenen Höhenschichten. Während der kurzwellige Bereich bereits größtenteils in der Stratosphäre absorbiert wird, kommt es im langwelligen Bereich eher in den unteren 10 Kilometern zur Absorption [6]. In den Wellenlängenbereichen der Strahlung, in denen keine bis kaum Absorption durch die Atmosphäre vorkommt, den sogenannten atmosphärischen Fenstern, können Fernerkundungsgeräte, zum Beispiel Satelliten, Einsatz finden (zum Beispiel im sichtbaren Bereich [50]).

### 2.3.4 Emission

Formel 1 ist hauptsächlich im solaren Bereich gültig, also wenn die getroffene Materie selbst nicht strahlt. Bei strahlender Materie kommt ein zusätzlicher Term hinzu, die Emissionszahl  $\epsilon$ , welche Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann [6]. Bei der Emission kommt es zum umgekehrten Prozess der Absorption, ein Elektron fällt von einem angeregten Zustand zurück in den Grundzustand und emittiert dabei Strahlung [26]. Dabei gilt, dass die Absorptionsmenge einer bestimmten Wellenlänge der Emissionsmenge dieser Wellenlänge entspricht. Es gilt also:



$$\epsilon(\lambda) = \alpha(\lambda) \quad (2)$$

Diesen Zusammenhang, also die Gleichheit von Emissionszahl und Absorptionszahl bei gleicher Wellenlänge, nennt man Kirchhoffsches Gesetz [6]. Einen Körper, welcher die einfallende Strahlung völlig absorbiert, nennt man schwarzen Körper. Gleichzeitig ist er daher auch ein idealer Strahler mit der Emissionzahl 1,  $\epsilon = 1$ . Die von einem Körper abgegebene Strahlung hängt von seiner Temperatur und seiner Oberfläche ab. Diesen Zusammenhang beschreibt das Stefan-Boltzmann-Gesetz:

$$P_e = \epsilon \sigma T^4 \quad (3)$$

$P_e$  ist darin die emittierte Leistung,  $\epsilon$  die oben beschriebene Emissionszahl, welche von der Oberflächenbeschaffenheit abhängig ist,  $T$  die Temperatur und  $\sigma$  ist die Stefan-Boltzmann-Konstante, welche folgenden Wert aufweist:

$$\sigma = 5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4} \quad (4)$$

Das Stefan-Boltzmann Gesetz zeigt also, dass die abgestrahlte Leistung proportional zur vierten Potenz der absoluten Temperatur ist [52]. Für einen idealen schwarzen Körper ist die gesamte Abstrahlung nur eine Funktion der Temperatur, das Stefan-Boltzmann-Gesetz gilt daher in folgender Form [6]:

$$P_e = \sigma T^4 \quad (5)$$

Der Wellenlängenbereich, in dem ein schwarzer Körper emittiert, wird durch das Plancksche Gesetz beschrieben [6]:

$$B_\lambda = B_\lambda(\lambda, T) = 2hc^2 \frac{\lambda^{-5}}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (6)$$

Dieser Zusammenhang zeigt, warum die Sonne im kurzwelligen Bereich Strahlung aussendet, die Erde hingegen im langwelligen Bereich. Die Sonne erreicht eine Durchschnittstemperatur von 5788 K, die Erde hingegen nur 255 K und dadurch haben sie unterschiedliche Wellenlängen ihrer abgegebenen Strahlung (Abbildung 6) [6].

## 2.4 Strahlungshaushalt der Erde

Für die Energiezufuhr der Erde ist die Sonnenenergie, also elektromagnetische Strahlung, verantwortlich. Die Menschen sind also auf das Zentralgestirn unseres Sonnensystems angewiesen. Besonders wichtig für die Entwicklung des Lebens auf der Erde, wie wir es kennen, sind außerdem die astronomischen Rahmenbedingungen der Erde. Der mittlere Abstand der Sonne zur Erde beträgt etwas weniger als 150 Mio. km (1 Astronomische Einheit), womit der solare Strahlungsfluss außerhalb der Erdatmosphäre  $1361 \text{ W m}^{-2}$  [30] beträgt, bezogen auf den senkrechten Einfall. Dieser Wert, auch als Solarkonstante bezeichnet, variiert im Laufe des Jahres auf Grund der leicht elliptischen Umlaufbahn der Erde um die Sonne um gut 3% von  $1328 \text{ W m}^{-2}$  bei größter Entfernung zur Sonne im Juli



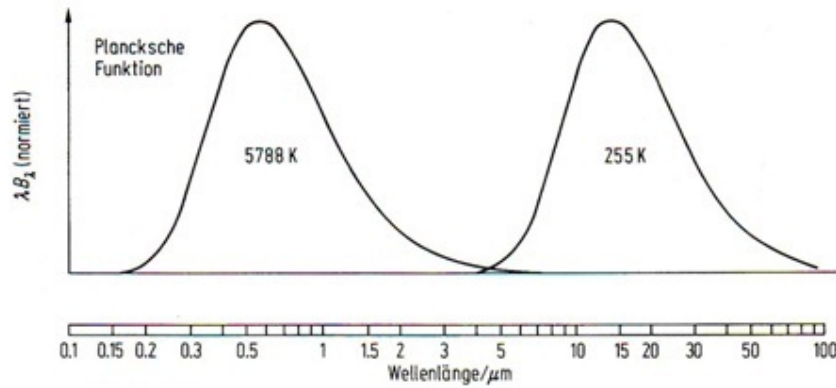


Abbildung 6: Die Strahlung der Sonne (5788K) und Erde (255K) [6]

(Aphel), bis  $1420 \text{ Wm}^{-2}$  bei Sonnennähe im Januar (Perihel). Weitere Veränderungen des solaren Strahlungsflusses können sich durch den 11-jährigen Sonnenaktivitätszyklus der Sonne ergeben. Durch Variationen der Sonnenaktivität kann es zum Beispiel bei zunehmendem Auftreten der dunklen Sonnenflecken zu einem Anstieg der Solarkonstante kommen. Auch längerfristige Trends der solaren Aktivität sind bekannt [19].

Die Variation der Solarkonstante ist weiter von der Exzentrizität der Erdbahn um die Sonne (Periode etwa 100 000 Jahre), der Neigung der Äquatorebene zur Ekliptik (Periode etwa 41 000 Jahre) und der Präzession der Erdrotationsachse (Periode etwa 21 000 Jahre) abhängig [19].

Die Strahlungs- oder Energiebilanz der Erde beschreibt das Gleichgewicht der einfallenden solaren Strahlung und der langwelligen Abstrahlung der Erde. Durch die bereits oben besprochenen beeinflussenden Prozesse auf die Strahlung kommt es zu dem Effekt, dass nicht die gesamte solare Strahlung, welche an der Atmosphärenobergrenze ankommt, an die Erdoberfläche gelangt. Umgekehrt wird auch die emittierte langwellige Strahlung der Erde nicht ungehindert ins All abgestrahlt. Diese Prozesse sind in Abbildung 7 dargestellt. Bei der solaren Strahlung gelangen im Mittel 30% durch Reflexion an Wolken und der Erdoberfläche sowie durch Rückstreuung an Luftmolekülen und atmosphärischen Partikeln, die so genannte Reflexstreuung [R], wieder ins Weltall zurück. Etwa 26% der einfallenden Strahlung werden innerhalb der Atmosphäre durch Ozon, Wolken und vor allem Wasserdampf absorbiert. Die restlichen 44% gelangen entweder auf direktem Weg (direkte Sonnenstrahlung [D]) oder über Streuungsprozesse zur Erdoberfläche (diffuse Himmelsstrahlung [H]) [27]. Die kurzwellige Strahlungsbilanz  $[Q_K]$  setzt sich also aus der direkten Sonnenstrahlung, der diffusen Himmelsstrahlung, beides Energielieferanten der Erdoberfläche, und der Reflexstrahlung, welche Energieverlust bedeutet, zusammen. Man kann daher folgende Aussage treffen:

$$Q_K = D + H - R \quad (7)$$

Da sich die Reflexstrahlung aus der Albedo  $[\rho]$  ergibt, kann man für [R] folgenden

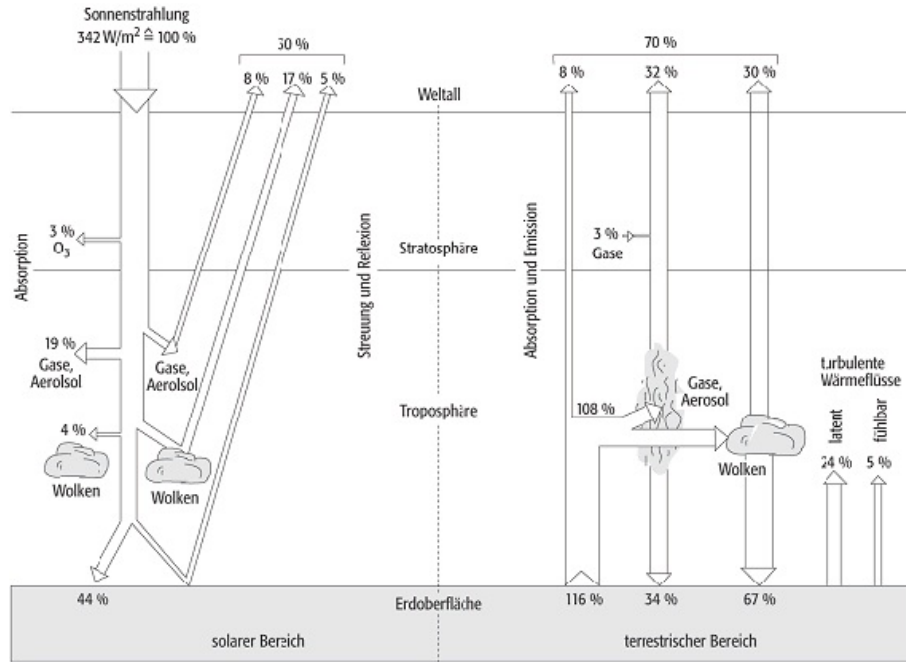


Abbildung 7: Der schematische Strahlungshaushalt der Erde [64]

Term einsetzen:

$$R = \rho * (D + H) \quad (8)$$

Daraus ergibt sich [28]:

$$Q_K = D + H * (1 - \rho) \quad (9)$$

Der langwellige Strahlungsbereich unterscheidet sich deutlich vom kurzwelligen, da langwellige Strahlung nicht gestreut oder direkt reflektiert wird. Ein wichtiger Prozess hierbei ist der Treibhauseffekt, ohne welchen die Temperatur der Erdoberfläche etwa 33°C kühler wäre [27]. Da sich die Erde im Strahlungsgleichgewicht befindet, muss die ausgestrahlte Energiemenge der Erde der einfallenden solaren Energie entsprechen. Da der Energieeintrag auf die gesamte sonnenbeschienene Erdhälfte dem auf einer senkrecht zur Sonnenrichtung aufgespannten Kreisfläche mit dem Erdradius ( $R = 6370\text{km}$ ) entspricht, gilt:

$$R^2 \pi S = 1,75 * 10^{17} \text{W}, \quad (10)$$

wobei  $S$  die Solarkonstante mit  $1370 \text{ W m}^{-2}$  ist. Da global etwa 30% der gesamten Energie davon auf direktem Weg durch die Reflexion verloren gehen, können die restlichen 70%, also  $1,225 * 10^{17} \text{ W}$ , im Erdsystem genutzt werden. Der abgestrahlte langwellige Strahlungsfluss der Erde kann, integriert über alle Wellenlängen, mit  $\sigma T_0^4$  dargestellt werden, wobei  $\sigma$  die oben erwähnte Stefan-Boltzmann-Konstante und  $T_0$  die mittlere

Oberflächentemperatur der Erde sind. Im stationären Gleichgewicht muss die über die gesamte Kugelfläche ( $4 R^2 \pi$ ) abgestrahlte Energie der im System verfügbaren Sonnenenergie entsprechen, also:

$$0,7S\pi R^2 = 4\pi R^2 \sigma T_0^4 \quad (11)$$

Daraus würde sich eine Temperatur von 255K, also  $-18^\circ\text{C}$ , auf der Erdoberfläche ergeben. Dass dem nicht so ist, verdanken wir dem Treibhauseffekt, welcher die langwellige Abstrahlung der Erde [A] daran hindert, ungehindert ins Weltall zu entweichen. In der Atmosphäre befinden sich natürliche und anthropogene Treibhausgase (siehe Abschnitt 2.4.1), wie  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  oder  $\text{CH}_4$ , welche die langwellige Strahlung in bestimmten Wellenlängen absorbieren und gemäß ihrer Temperatur wieder reemittieren und zur Erde zurückstrahlen. Diese atmosphärische Gegenstrahlung [AG] ist dafür verantwortlich, dass die Erdoberfläche eine zusätzliche Energiezufuhr erfährt [19]. Analog zur kurzwelligen Strahlungsbilanz der Erdoberfläche kann man diese auch für den langwelligen Bereich [ $Q_L$ ] angeben, wobei hier die atmosphärische Gegenstrahlung als Energiezufuhr und die Erdastrahlung [A] als Energieverlust dienen [28]:

$$Q_L = AG - A \quad (12)$$

Die gesamte Strahlungsbilanz der Erdoberfläche kann nun als Kombination der kurz- und langwelligen Bilanzen dargestellt werden [28]:

$$Q = Q_K + Q_L = D + H * (1 - \rho) + AG - A \quad (13)$$

Die Strahlungsbilanz zeigt, dass es sowohl vertikal als auch horizontal zu einem Ungleichgewicht der Strahlungsenergie kommen würde, wenn es keine Ausgleichsbewegungen gäbe. So wäre die Atmosphäre deutlich kälter als die Erdoberfläche und die hohen Breiten weit kühler. Letztendlich gibt es zwei wichtige Energieflüsse, welche Wärme von der Erdoberfläche in die Atmosphäre übertragen und somit einen wesentlichen Anteil an der Energiebilanz der Erde haben. Hierzu zählt der **sensible oder fühlbare Wärmestrom** [L], welcher auf Grund von Konvektion und Turbulenz in der Atmosphäre Luftpakete von der Oberfläche in größere Höhen der Atmosphäre bringt. Konvektion beschreibt dabei den Prozess der Erwärmung der Luft an der Erdoberfläche mit der Folge, dass diese durch die unterschiedliche relative Dichte aufsteigt. Mit Turbulenz meint man die Tendenz der Durchmischung der Luft während ihrer Bewegung. Dies kann zum Beispiel durch Hindernisse an der Oberfläche zustande kommen. Der zweite Wärmefluss ist der **latente Wärmestrom** [V]. Dieser beschreibt die Energie, welche bei der Verdampfung im Zuge der Evaporation oder durch Kondensation von Wasserdampf als Nebel, Dunst oder Wolken frei wird. Der Wärmebetrag, der für diese Prozesse benötigt wird, nimmt einen deutlichen Anteil an der Energiebilanz der Erde ein [11].

An einem Standort kommt es auch zu einem Ungleichgewicht zwischen Tag und Nacht, wobei in den nächtlichen Stunden die Bilanz negativ und am Tag positiv ist. Dafür benötigt das System Erde Ausgleichsmechanismen, um diesem Ungleichgewicht entgegenzuwirken. Hier kommen auch wieder der sensible und der latente Wärmestrom zur Geltung.

Neben diesen beiden gibt es allerdings noch einen dritten Mechanismus, den Bodenwärmestrom [B]. Dieser gleicht ein Temperaturgefälle in verschiedenen Schichten aus, wobei die transportierten Energiemengen mit der Wärmeleitfähigkeit des Bodens wachsen. Tagsüber kommt es also zu einem Strahlungsüberschuss, wobei diese drei Wärmeströme diesen aufnehmen, nachts geben sie diese Energie wieder ab um das Defizit auszugleichen. Das heißt, dass die Energiesumme der drei Wärmeströme dem Betrag der Strahlungsbilanz gleich sein muss, womit sich folgende Gleichung ergibt [28]:

$$|Q| = B + L + V \quad (14)$$

Für einen bestimmten Standort ist daher die Strahlungsmenge für die Energiemenge von Tag und Nacht verantwortlich, wodurch der Tagesgang der Einstrahlung von dem Tagesgang der Energiebilanzgrößen determiniert wird.

#### 2.4.1 Energiebilanzgrößen eines Standortes

Für die oben dargestellten Prozesse der Streuung, Absorption und Reflexion sind Substanzen nötig, welche die Strahlung in dieser Form beeinflussen. Diese haben entscheidenden Einfluss auf die Energiebilanz und somit die Temperatur eines Standortes. Wie in Abbildung 7 dargestellt können Wolken, Aerosole und verschiedene Gase mit der Strahlung wechselwirken.

#### Bewölkung

Wolken bestehen aus kleinen in der Luft befindlichen Wassertropfen oder Eiskügelchen mit einem Durchmesser von etwa 20 bis 50  $\mu\text{m}$ . Sie entstehen an so genannten Kondensationskernen, an denen sich die Wassermoleküle mit diesem, etwa 0,1 bis 1  $\mu\text{m}$  großen Partikel verbinden können. Es gibt verschiedene Wolkenarten mit verschiedener Mächtigkeit in unterschiedlichen Höhen. Alle haben spezielle Eigenschaften in Bezug auf die Strahlungsbeeinflussung [50].

Schmetz und Raschke zeigten 1986 mit Hilfe eines Strahlungsübertragungsmodells, wie unterschiedliche Wolkenformen sich auf die kurzwellige und langwellige Strahlung auswirken (Abbildung 8). In ihrem Beispiel zeigten sie den Einfluss einer Wasserwolke in 2 km Höhe sowie den einer Eiskügelchenwolke in 10 km Höhe. Beide Wolkenarten haben Auswirkungen auf die Strahlungsbilanz. Die tiefer liegende, optisch dickere Wolke hat auf die solare Einstrahlung mehr Einfluss als die dünne Eiskügelchenwolke. Die langwellige Strahlung, welche von der Atmosphäre wieder auf die Erdoberfläche zurückgestreut wird, wird durch beide Wolkenarten verstärkt, durch die Wasserwolke allerdings stärker. Insgesamt überwiegt allerdings die Abschwächung der kurzwelligen einfallenden Strahlung, sodass die Strahlungsbilanz am Boden verringert wird. Am oberen Rand der Atmosphäre kommt es bei der Eiskügelchenwolke zu einem geringen Anstieg der Strahlungsbilanz, bei der tiefer liegenden Wasserwolke allerdings zu einem deutlichen Verlust, da diese wesentlich wärmer ist als die Eiskügelchenwolke und damit mehr Energie emittiert [44].

Ein weiteres Beispiel des Einflusses der Bewölkung auf die Energiebilanz zeigt die Studie von Galli et al. 2004. Diese beschreibt die Beeinflussung des Strahlungsantriebes

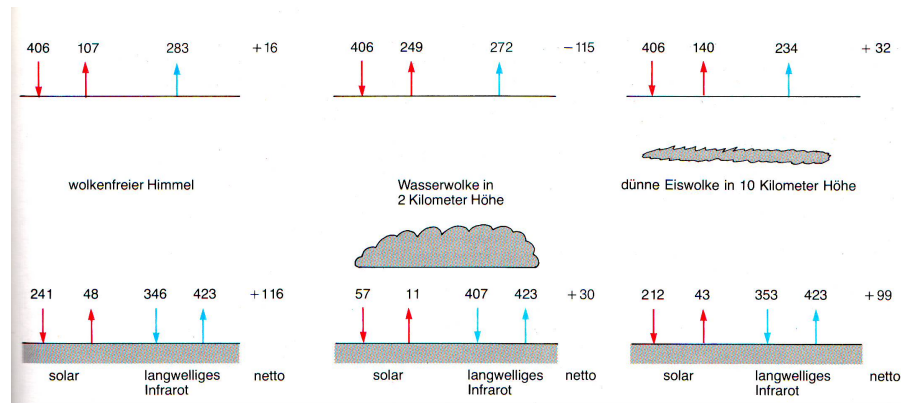


Abbildung 8: Strahlungsbeeinflussung durch Wolken [44] (rote Pfeile = kurzwellige Strahlung; blaue Pfeile = langwellige Strahlung; in  $\text{Wm}^{-2}$ )

durch Bewölkung an einer Station im Po-Tal, Italien. Nach einer Beobachtungsmessreihe von einem Jahr konnten sie feststellen, dass die ankommende kurzwellige Strahlung mit zunehmender Wolkendicke abnahm, die langwellige Strahlung hingegen zunahm. Unterschiedliche Wolkenarten zeigten außerdem unterschiedliche Effekte. So kam es bei Stratuswolken zu einer geringen Abkühlung der Erdoberfläche, Cumuluswolken hatten eine starke Abkühlung und Cirruswolken eine geringe Erwärmung zur Folge [23].

An diesen Beispielen ist gut erkennbar, dass sich Zu- oder Abnahmen der Bewölkung sowie Veränderungen der Wolkenarten und ihrer Höhe verschieden auf das Klima auswirken können.

## Aerosole

Aerosole sind kleine Partikel oder Tröpfchen in der Atmosphäre, nicht größer als  $1 \mu\text{m}$ . Es gibt zwei Arten von Aerosolen, primäre und sekundäre. Erstere, primäre Aerosole, stammen direkt von der Verbreitung von Material von der Erdoberfläche, wie zum Beispiel Meeressalz oder Staub, sekundäre entstehen durch chemische Reaktionen in der Atmosphäre (Tabelle 2). Außerdem kann man sie nach ihrem Ursprung in natürliche und anthropogene Aerosole unterscheiden. Diese Unterscheidung ist allerdings nicht immer einfach zu treffen, da ein großer Anteil des „natürlichen“ Staubes durch anthropogene Tätigkeiten in die Atmosphäre gelangt. Andererseits wird z.B. Ruß durch natürliche Waldbrände in die Luft abgegeben. Es wird angenommen, dass etwa 70 % aller Aerosole natürlichen Ursprungs sind. [43].

Trotz ihrer geringen Größe kann man das Vorhandensein von Aerosolen in der Atmosphäre recht gut erkennen, da sie die Luft trüb erscheinen lassen. Das kommt daher, dass sie Einfluss auf die einfallende Strahlung haben und diese teilweise absorbieren, streuen oder reflektieren. Außerdem können Aerosole als Kondensationskerne für die Wolkenbildung dienen [7]. Durch ihre direkten und indirekten Eigenschaften beeinflussen sie somit die Energiebilanz und damit auch die Temperatur eines Standortes. In erster Linie ver-

Tabelle 2: Aerosolquellen [7]

<i>Quelle</i>	<i>Rate(Tga<sup>-1</sup>)</i>
<b>primäre Aerosolquellen</b>	
Waldbrand	35
Staub	300
Meeressalz	1000
Vulkanstaub	50
Meteoritenstaub	1
<b>sekundäre Aerosolquellen</b>	
Sulfatproduktion	150
Nitratproduktion	250
Organische Partikel	100

ringern sie durch ihre Absorptions- und Streueigenschaften den Strahlungsfluß zur Erdoberfläche. Viele Modelle zeigen, dass möglicherweise die Abkühlung der Erdoberfläche durch Aerosole die größte Unsicherheit der Klimavorhersage mit sich bringt [35].

Obwohl die Menge der natürlichen Aerosole in der Atmosphäre dominiert, gibt es noch wenige Studien zum Einfluss dieser auf den Strahlungshaushalt. Satheesh und Krishna Moorthy (2005) geben einen Überblick über den bisherigen Stand. Auf Grund der geringen Untersuchungsichte gibt es noch sehr viele Unsicherheiten, was den Einfluss der natürlichen Aerosole auf die Strahlung betrifft. Generell ist ein zunehmender Trend der natürlichen Aerosole zu verzeichnen. Besonders durch Abholzung, Desertifikation oder andere anthropogene Aktivitäten wird die Emission von natürlichen Aerosolen begünstigt. Im Gegensatz zu den anthropogenen Aerosolen gibt es für die natürlichen keine Kontrollmaßnahmen der Regierungen [43].

Satheesh und Krishna Moorthy zeigen, dass ein Großteil der natürlichen Aerosole (Meersalz und natürliche Sulfate) keine absorbierenden Eigenschaften aufweisen. Darum können sie teilweise den Strahlungsantrieb durch den Treibhauseffekt oder andere absorbierende Aerosole (z.B. Ruß) ausgleichen. Mineralischer Staub hingegen absorbiert und streut Strahlung, daher kann es zu einer Abkühlung der Erdoberfläche bzw. zu einer Erwärmung der Atmosphäre kommen. Dies begünstigt die Stabilität der unteren Atmosphärenschichten und mindert somit Konvektion. Bei einem Anstieg der Meersalze könnten diese bei starken Windgeschwindigkeiten als Kondensationskerne für die Wolkenbildung dienen, was zu einer erhöhten Albedo führen würde. Dies zeigt, dass die indirekten Effekte der Aerosole großen Einfluss auf die Strahlungsbilanz, nach Satheesh und Krishna Moorthy sogar größeren Einfluss als die direkten Effekte haben [43].

Der direkte Einfluss der anthropogenen Aerosole auf den Strahlungshaushalt ist größer als der der natürlichen Aerosole [43]. Das bekannteste anthropogene Aerosol ist vermutlich Ruß. Dieses absorbiert und streut die einfallende Strahlung. Das in Ruß enthaltene so genannte „Black Carbon“ ist der absorbierende Teil des Rußes und hat Absorptionsbanden im Bereich des sichtbaren Lichtes und im Bereich des nahen Infrarots. Emittiert wird dieses Aerosol bei jedem Verbrennungsvorgang – Waldbrände, Industrie- und Verkehrsabgase, etc. [3, 40].

Black Carbon kann über weite Strecken in der Atmosphäre transportiert werden und sich dort mit anderen Aerosolen zu einer so genannten atmosphärischen „Brown Cloud“ mit einer Größenordnung von 3–5 km entwickeln. Durch ihre Absorptionseigenschaften erwärmt sie die Atmosphäre enorm und verringert somit den Strahlungsfluss zur Erdoberfläche, wo es zu einer Abkühlung und Verdunkelung kommt [40].

Der indirekte Einfluss des Black Carbon bzw. der Brown Clouds ist die Verminderung oder Vergrößerung der Wolkendecke und des Regens. Einerseits kommt es durch die Absorption zur Erwärmung und somit zur Verdunstung und Verringerung der relativen Feuchte, die Wolkendecke und die Albedo nehmen ab. Andererseits dienen die Aerosole in der Brown Cloud als Kondensationskeime für die Wolkenbildung, was die Albedo erhöht. Außerdem kommt es durch die Erwärmung zu verstärkter Konvektion, was ebenfalls die Bewölkung fördert. Der Effekt der Vermehrung der Wolkendecke dürfte laut Ramanathan und Carmichael (2008) der dominierende sein [40].

Im Zuge des Klimawandels und der vermehrten Dürre könnte es außerdem zu einer Verstärkung der Problematik des „Global Dimming“ durch Brown Clouds kommen [40].

## **Treibhausgase**

Der Treibhauseffekt ist für die moderaten Temperaturen auf der Erde verantwortlich. Viele der natürlich vorkommenden Treibhausgase haben sich auf Grund verstärkter menschlicher Aktivität deutlich vermehrt. An dieser Stelle sollen einige aufgezählt und kurz erläutert werden.

### ***Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)***

Kohlendioxid weist mit einer Leistung von  $1,66 \pm 0,17 \text{ Wm}^{-2}$ , berechnet auf Basis der Veränderung von 1750 bis 2005 (Tabelle 3), den größten Anteil am anthropogenen Strahlungsantrieb auf [22]. In den letzten 250 Jahren hat sich Kohlendioxid von einem Level um 280 ppm auf einen Level von 379 ppm vermehrt, was ein Plus von 36% bedeutet. Besonders im letzten Jahrzehnt war der Anstieg enorm [22]. Dieser rasante Anstieg seit der industriellen Revolution wurde durch die vermehrte menschliche Aktivität, vor allem durch Nutzung fossiler Brennstoffe, Benzinaufbereitung, Zementproduktion, Landnutzungsänderungen, hier besonders Abholzung und Biomasseverbrennung, hervorgerufen. Besonders die ersten drei genannten sind in den letzten 30 Jahren für den Anstieg des Treibhausgases verantwortlich, da diese in diesem Zeitraum um etwa 70% verstärkt

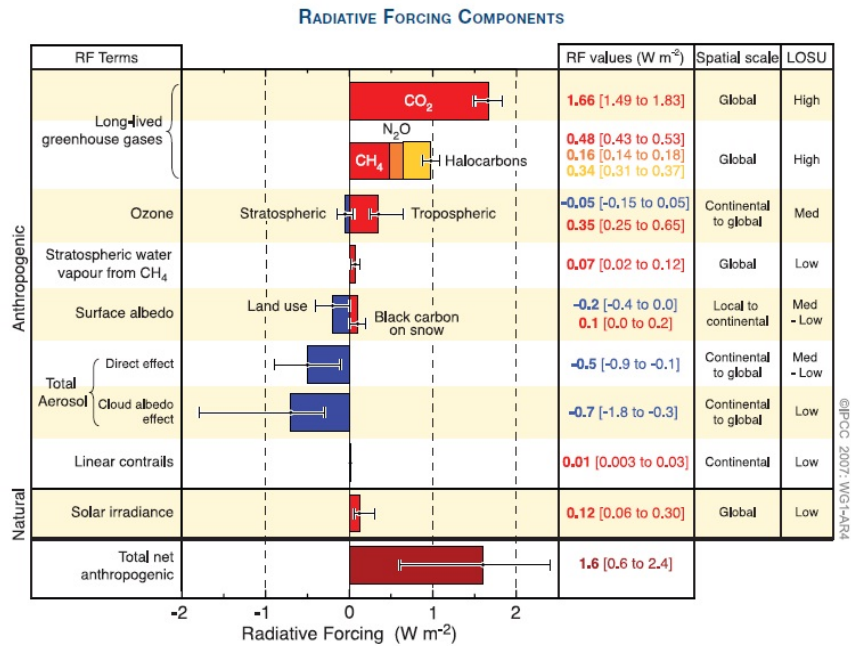


Abbildung 9: Klimawirksame Komponenten der Atmosphäre: ihr Strahlungsantrieb, räumliche Verteilung und Untersuchungsgrad [22]

wurden und zirka  $\frac{3}{4}$  des vom  $\text{CO}_2$  verursachten Strahlungsantriebs von der Verbrennung fossiler Brennstoffe und der Zementfabrikationen herrühren [22].  $\text{CO}_2$  ist in der Atmosphäre sehr gut durchmischt, wodurch es global wirksam ist. Kohlendioxid ist im Vergleich zu anderen Treibhausgasen sehr gut untersucht.

### **Methan ( $\text{CH}_4$ )**

Nach Kohlendioxid ist Methan das zweitwichtigste anthropogen emittierte Treibhausgas in der Atmosphäre der Erde. Seine Klimawirksamkeit ist „molekular gesehen“ sogar deutlich höher, als die des  $\text{CO}_2$  (Tabelle 3) [56]. Der Beitrag von Methan am anthropogenen Strahlungsantrieb, gemessen von 1750 bis 2005, hat einen Wert von  $0,48 \pm 0,05 \text{ Wm}^{-2}$ , womit es Rang 2 einnimmt [22].  $\text{CH}_4$  ist ein natürliches Treibhausgas, seine Konzentration in der Atmosphäre hatte in den letzten 650 000 Jahren bis zur Mitte des 18. Jahrhunderts einen konstanten Wertebereich von etwa 400 ppb bis 700 ppb. 2005 wurde allerdings ein noch nie da gewesener Wert von über 1770 ppb gemessen. In den letzten 25 Jahren gab es einen deutlichen absoluten Anstieg der  $\text{CH}_4$ -Konzentration in der Atmosphäre, die Wachstumsrate reduzierte sich allerdings allmählich. Außerdem unterliegt diese starken jährlichen Veränderungen. Der Grund dafür ist nicht klar, könnte aber mit dem Ungleichgewicht der Quellen und Senken von Methan in Beziehung stehen [22]. Für dieses Treibhausgas gibt es eine Vielzahl von Quellen wie zum Beispiel Feuchtgebiete, Reisfelder, Biomasseverbrennung, Wiederkäuer oder auch industrielle Quellen wie die



Tabelle 3: Konzentrationen und anthropogener Strahlungsantrieb von CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O [22]

<i>Konzentrationen</i>			<i>Strahlungsantrieb</i>		
	<i>2005</i>	<i>Veränderung seit 1998</i>	<i>2005 (Wm<sup>-2</sup>)</i>	<i>Veränderung seit 1998 (%)</i>	<i>Wirksam- keit(W/m<sup>2</sup> ppb<sup>-1</sup>)</i>
<b>CO<sub>2</sub></b>	379 ± 0,65 ppm	+13 ppm	1,66	+13	1,4 x 10 <sup>-5</sup>
<b>CH<sub>4</sub></b>	1,774 ± 1,8 ppb	+11 ppb	0,48	-	3,7 x 10 <sup>-4</sup>
<b>N<sub>2</sub>O</b>	319 ± 0,12 ppb	+5 ppb	0,16	+11	3,03 x 10 <sup>-3</sup>

Gewinnung fossiler Brennstoffe, allerdings kaum Senken. Der wichtigste Auswaschungsprozess in der Atmosphäre ist die Reaktion von  $\text{CH}_4$  mit OH, dem Hydroxyl-Radikal, andere sind zum Beispiel die Reaktion mit freien Chlorgasen, die Zerstörung in der Troposphäre oder die Reaktion mit dem Boden [56, 22]. Methan ist außerdem ein sehr leicht reaktives Spurengas in der Troposphäre, wodurch es sehr wichtig für die Troposphären-, aber auch die Stratosphärenchemie ist. In der Troposphäre ist Methan, wie bereits erwähnt, vor allem mit dem Hydroxyl-Radikal (OH) reaktiv, wobei Formaldehyd ( $\text{CH}_2\text{O}$ ), Kohlenmonoxid (CO) und Ozon ( $\text{O}_3$ ) gebildet werden. In der Stratosphäre beeinflusst  $\text{CH}_4$  die Konzentration von Wasserdampf und Ozon [56].

### **Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ )**

Lachgas nimmt am anthropogenen Strahlungsantrieb Platz 4 mit einem Wert von  $0,15 \pm 0,02 \text{ Wm}^{-2}$  ein. Das drittwichtigste Treibhausgas ist der rein anthropogen produzierte Fluorchlorkohlenwasserstoff (FCKW-12). Mit der Reduzierung der Fluorchlorkohlenwasserstoffe durch das Montreal-Protokoll wird Lachgas allerdings bald das drittwichtigste der treibhauswirkenden Spurengase sein. Seit 1750 ist  $\text{N}_2\text{O}$  von einem Level von etwa 270 ppb auf einen Level von 314 ppb im Jahr 1998 angestiegen. Seitdem gibt es einen stetigen Anstieg um etwa 0,26% jährlich mit einem Level von 319 ppb im Jahr 2005. Lachgas ist ein sehr langlebiges Treibhausgas mit einer Verweildauer von 114 Jahren. Die Hauptquellen dieses Gases stellen die mikrobiologischen Tätigkeiten der Ozeane, des Bodens der Flüsse oder anderer biologisch aktiver Oberflächen dar. Industriell beeinflusst wurden die Emissionsmengen durch die Ausweitung der Landwirtschaft und im Zuge vermehrter Düngung. Die einzige erwähnenswerte Senke ist die Reaktion in der Stratosphäre, wo  $\text{N}_2\text{O}$  die Hauptquelle für die ozonzerstörenden Substanzen NO und  $\text{NO}_2$  darstellt [22].

### **Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs)**

In der heutigen Atmosphäre werden viele Gase aus anthropogenen Quellen emittiert. Unter ihnen auch sehr starke Treibhausgase, wie Fluorkohlenwasserstoffe (FCKWs), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FCKWs), Chlorkohlenstoffe, Bromkohlenstoffe und Halogene. Diese haben auch eine zerstörende Wirkung auf die Ozonschicht. Darum wurde im Montreal Protokoll 1989 teilweise ihre Abschaffung festgelegt, um das Fortschreiten des Ozonloches zu unterbinden. Auf Grund der langen Lebensdauer dieser Substanzen ist ein Rückgang bzw. ein Plateauniveau erst um das Jahr 2000 erreicht worden. Das bekannteste und effektivste Treibhausgas dieser Gruppe ist FCKW-12, welches, wie bereits erwähnt, nach  $\text{CO}_2$  und  $\text{CH}_4$  den dritten Rang zum anthropogenen Strahlungsantrieb einnimmt. Es hat eine Strahlungswirksamkeit von  $0,32 \text{ Wm}^{-2} \text{ ppb}^{-1}$ , was im Vergleich zu anderen auch natürlich vorkommenden Treibhausgasen enorm ist (vgl. Tabelle 3). FCKWs fanden seit etwa 1950 Einsatz als Treibmittel für Spraydosen bzw. als Kühlmittel in Kühlschränken. Bis 1990 gab es bei den Emissionen einen stetigen Anstieg, erst durch das Montreal Protokoll konnte dieser gesenkt werden. FCKW-12 hat

eine Lebensdauer von 100 Jahren, es kann also maximal 1% pro Jahr in der Atmosphäre abgebaut werden, auch wenn es keine Emissionen dieses Stoffes gibt. Die maximale Konzentration des starken Treibhausgases wurde 2003 gemessen [22].

### **Ozon ( $O_3$ )**

Wie in Abbildung 5 erkennbar ist, hat Sauerstoff, molekular gebunden in  $O_2$  oder  $O_3$ , Absorptionseigenschaften sowohl im kurzwelligen, als auch im langwelligen Bereich. Dadurch schützt Ozon einerseits das Leben auf der Erdoberfläche durch die Absorption der schädlichen UV-Strahlung, was zu einer Erwärmung der Stratosphäre führt, andererseits trägt es zum Treibhauseffekt bei. Vor allem in der oberen Troposphäre, in Höhen von 7 bis 10 km, kommt es zur Aufnahme der langwelligen Strahlung [8]. Besonders wichtig hierbei ist, dass Ozon in einem Spektralband die Infrarotstrahlung absorbiert in der kaum ein anderes Klimagas absorbierende Eigenschaften aufweist (siehe Abbildung 5). Im Vergleich zu den anderen angeführten Treibhausgasen ist Ozon ein sehr reaktives Gas und hat daher eine sehr kurze Lebensdauer. Dadurch ist es sehr schwierig, Ozon in Modellrechnungen zu kalkulieren, da es ein hohes Verständnis der Chemie der Troposphäre voraussetzt [8].

Vor etwa 30 Jahren hat man erkannt, dass der Anstieg im troposphärischen Ozon auf Grund der erhöhten Luftverschmutzung durch  $NO_x$ , CO und andere Stoffe einen großen Anteil am globalen Strahlungsantrieb durch Treibhausgase einnimmt [41, 20]. Beim troposphärischen Ozon zeigen sich große regionale Unterschiede in den Trends der letzten Jahre. Da das Treibhausgas vor allem sekundär durch chemische Verbindungen aus anderen Abgasen entsteht (siehe Abschnitt 3.1.1), wird die Konzentration durch diese determiniert. In den industriellen Ländern wie den USA oder den OECD-Ländern Europas wurden die Emissionen dieser Precursoren bereits reduziert. In Entwicklungsregionen verzeichnet man allerdings einen starken Anstieg dieser Abgase. Da es sehr wenige Stationen mit langen Ozonmessreihen gibt, ist es sehr schwierig einen langfristigen Trend der letzten Jahrhunderte festzustellen. Für Europa kann man allerdings sagen, dass die Ozonkonzentration vom Beginn des 20. Jahrhunderts bis zu den frühen 1980er Jahren stetig zugenommen hat, danach stellte sich ein konstanter Wert ein, regional gab es leichte Abnahmen.

Es gibt bereits viele Studien, in denen der Strahlungsantrieb des troposphärischen Ozons in Modellen berechnet wurde (Abbildung 10). Der Medianwert des Strahlungsantriebes dieser dargestellten Studien liegt bei  $+0,35 \text{ Wm}^{-2}$  [22]. Der von Forster et al. 1996 berechnete Strahlungsantrieb beträgt  $+0,3$  bis  $0,5 \text{ Wm}^{-2}$  im globalen Mittel. Die Spitzenwerte seien dabei in Regionen von  $30^\circ$  nördlicher Breite mit bis zu  $0,8 \text{ Wm}^{-2}$  festgestellt worden. Generell verzeichnet die nördliche Hemisphäre einen größeren Anteil am Strahlungsantrieb durch troposphärisches Ozon (Tabelle 4). Außerdem betonen Forster et al., dass die Miteinbeziehung der Bewölkung sowie der Stratosphäre von großer Bedeutung sind, da der Strahlungsantrieb des troposphärischen Ozons sonst um etwa 66% überschätzt wird [20].

Stevenson et al. verwendeten bei ihrer Studie von 1998 ebenfalls das U.K.-Meteorological-

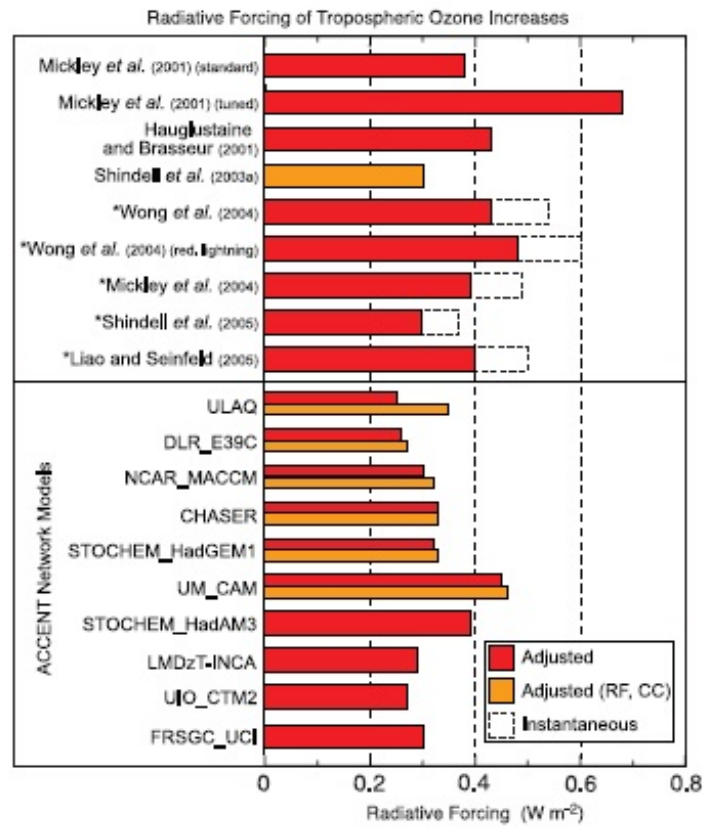


Abbildung 10: Verschiedene Modellrechnungen des Strahlungsantriebs durch troposphärisches Ozon seit 1750 [22]

Tabelle 4: Mittlerer Strahlungsantrieb des troposphärischen Ozons in  $\text{Wm}^{-2}$  seit der vorindustriellen Zeit, berechnet mit dem 2-D-Modell des U.K. Meteorological Office (UKMO) sowie dem Cambridge 2-D-Modell (CAMB) [20]

verwendetes Modell	Monat	nörtl. Hemisphäre	südl. Hemisphäre	Global
UKMO	Jänner	0,28	0,26	0,27
	Juli	0,41	0,22	0,32
	Durchschnitt	0,35	0,24	0,30
CAMB	Jänner	0,55	0,40	0,47
	Juli	0,67	0,43	0,55
	Durchschnitt	0,61	0,42	0,51

Office-Modell (vgl. Abbildung 4), allerdings in der 3-D-Methode und berechneten damit den Strahlungsantrieb durch Ozon. Sie ermittelten diesen von 1860 bis 1950 ( $0,13 \text{ Wm}^{-2}$ ), 1970 ( $0,22 \text{ Wm}^{-2}$ ), 1990 ( $0,29 \text{ Wm}^{-2}$ ) und auch für die Zukunft bis 2100 ( $0,48 \text{ Wm}^{-2}$ ) [48].

Haywood et al. (1998) modellierten einen Beitrag des troposphärischen Ozons am Strahlungsantrieb von  $0,29$  bis  $0,35 \text{ Wm}^{-2}$  im Mittel. Sie zeigten, dass 80% davon durch die Absorption der langwelligen Strahlung erfolgt [29].

Diese Ergebnisse zeigen, dass troposphärisches bzw. bodennahes Ozon einen Einfluss auf den Strahlungshaushalt aufweist und demgemäß auch die Temperatur beeinflussen kann.

## Wochenzyklen meteorologischer Größen

Ein guter Indikator um anthropogenen Einfluss festzustellen ist das Vorfinden eines Wochenzyklus [13]. Verschiedene Studien zeigen, dass meteorologische Parameter, z.B. Temperatur, Bewölkung, etc., einem Wochenzyklus folgen [13, 21, 32, 49]. Da diese durch die oben beschriebenen Parameter beeinflusst werden, ist es naheliegend, dass auch diese einen Wochenzyklus aufweisen. Im Folgenden soll ein Überblick über Studien gezeigt werden, welche eine Abhängigkeit des Auftretens von Strahlungsbilanzparametern mit den Wochentagen zeigen konnten.

Cervený and Coakley konnten 2002 auf Hawaii einen Wochenzyklus des Treibhausgases  $\text{CO}_2$  feststellen. Die Kohlendioxidwerte der Inselgruppe waren an den Wochenenden geringer als an den Wochentagen. Die Autoren beziehen diesen Zusammenhang auf anthropogene Aktivitäten auf Hawaii, da die  $\text{CO}_2$ -Werte des Südpols (Antarktis) keinem Wochenzyklus folgen [12].

Die Bewölkung sowie die Einstrahlungsintensität können ebenfalls Wochentagsunterschiede aufweisen. Kim et al. (2009) konnten in Korea einen höheren Bewölkungsgrad sowie eine geringere Einstrahlung ab der Wochenmitte (Mittwoch und Donnerstag) feststellen. Montags gab es die geringste Bewölkung und eine höhere Einstrahlung. Ein Wochenzyklus der meteorologischen Parameter war vor allem im Herbst zu verzeichnen. Kim et al. führen dieses Phänomen auf die Bewölkung und ihren Zusammenhang mit den Aerosolen, welche einen deutlichen Wochenzyklus aufwiesen, zurück [32].

In Australien konnten Simmonds und Keay (1997) einen Wochenzyklus für die Temperatur und den Regen feststellen, allerdings nur im Winter. Im Sommer gab es keine deutlichen Wochentagsunterschiede. Bei der Untersuchung der sehr langen Datenreihe (1856–1990) konnte festgestellt werden, dass es an Werktagen größere Temperaturamplituden und auch mehr Regen gab. Besonders deutlich ausgeprägt ist dieses Phänomen in der Zeitspanne von 1964–1990. Simmonds und Keay gehen davon aus, dass die Luftverschmutzung sowie die Wärmeemission durch Heizungen dafür verantwortlich sind [47].

1998 untersuchten Cervený und Balling das Auftreten eines Wochenzyklus der Gase Ozon und Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ). Sie ermittelten, dass diese beiden Substanzen am Beginn der Woche die niedrigsten, am Ende der Woche die höchsten Werte aufwiesen. Außerdem erkannten sie, dass es an den Wochenenden mehr regnete [13].

In vielen Studien wird ein typischer Wochenzyklus von Ozon erkannt – der so genannte „Weekend-Effekt“ [2, 9, 17, 24, 25, 31, 36, 38, 39, 42, 53, 57]. Dabei kommt es trotz geringerer Precursor-Emissionen zu höheren Ozonwerten an den Wochenenden.

Gründe für den Weekend-Effekt sind in Abschnitt 3.1.1 erläutert.

## 3 Chemische Grundlagen

### 3.1 Luftschadstoffe

Als Schadstoffe werden Stoffe bezeichnet, welche schädlich für Menschen, Tiere, Pflanzen oder andere Organismen sowie ganze Ökosysteme sein können. Es genügt dabei oft, wenn nur eines dieser Kriterien erfüllt ist. Diese Schadstoffe können die menschliche Gesundheit, die Umwelt, das Klima, die Ozonschicht, das Grundwasser oder Sachgüter beeinträchtigen. Die an die Luft abgegebenen Schadstoffe verbreiten sich und wirken dann auf die Umwelt ein. Um die Schadstoffkonzentrationen überschaubar zu machen, spielt die Einführung von Grenz-, Richt- und Orientierungswerten eine wichtige Rolle, vor allem im juristischen Bereich [33].

Luftschadstoffe sind auf der Erde nicht gleich verteilt. Besonders in stark bevölkerten und Industriegebieten kommt es zum vermehrten Ausstoß von schädlichen Atmosphärgasen. Dabei ist auf Grund der geographischen Verteilung solcher Ballungsräume besonders die Nordhemisphäre betroffen [4].

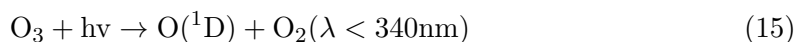
Generell kann man zwischen primären und sekundären Schadstoffen unterscheiden, wobei die primären aus lokalisierbaren Quellen direkt in die Luft abgegeben werden, wie CO, CO<sub>2</sub>, NOH<sub>3</sub>, Kohlenwasserstoffe, NO oder SO<sub>2</sub>. Sekundäre Schadstoffe entstehen aus Primärprodukten und anderen Luftbestandteilen zu einem anderen Schadstoff. Hierzu zählen zum Beispiel Peroxyacetylnitrat (PAN), Aldehyde und Ozon [33].

#### 3.1.1 Ozon

Die größten Ozonmengen der Erde befinden sich in der Stratosphäre, wo sie die schädliche UV-Strahlung absorbieren und somit zum Großteil von der Erdoberfläche abschirmen. Die Ozonkonzentrationen in der Troposphäre sind wesentlich geringer und vor allem ein Produkt der dort ablaufenden Photochemie. Stratosphärischer Eintrag spielt dabei nur eine Nebenrolle [14, 15].

#### Ozonentstehung und -abbau

Die Chemie der Troposphäre wird vor allem durch die Solarstrahlung angetrieben, da diese Ozon (O<sub>3</sub>) in molekularen Sauerstoff (O<sub>2</sub>) und atomaren, angeregten Sauerstoff (O(<sup>1</sup>D)) aufspalten kann:



Die meisten der angeregten Sauerstoffatome verlieren ihre überschüssige Energie im Zuge von Kollisionen mit anderen Molekülen, danach können sie mit molekularem Sauerstoff, mit Hilfe eines Stoßpartners (M), wieder Ozon bilden:

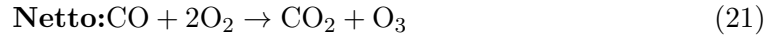
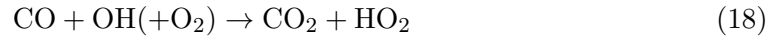


Der restliche angeregte Sauerstoff hat genug Energie, um mit einem Wasserdampf-molekül OH-Radikale zu formen:

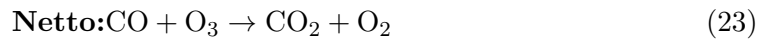
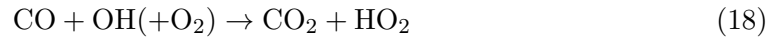


OH-Radikale spielen für die Sauberkeit der Luft eine große Rolle, da sie für die Auswaschung vieler Bestandteile verantwortlich sind [15].

Fast alle in die Atmosphäre emittierten Gase reagieren mit OH, vor allem CO, CH<sub>4</sub> und die Reaktionsprodukte von CH<sub>4</sub> reagieren sehr schnell mit dem Radikal. Diese Reaktionsketten führen in Abhängigkeit der NO<sub>x</sub>-Konzentration (NO + NO<sub>2</sub>) in der Umgebung zu der Produktion oder dem Abbau von Ozon [15]. So kommt es durch die Reaktion von CO mit OH zur Reaktionsfolge:



In NO<sub>x</sub>-armer Umgebung reagiert das HO<sub>2</sub> aus Reaktion 18 allerdings mit O<sub>3</sub>, wodurch es zum Ozonabbau kommt [16]:



Das meiste HO<sub>2</sub> wird durch die Reaktion 18 gebildet, allerdings kann es auch zur Bildung des Radikals durch folgende Reaktion kommen:



Aus dieser Reaktion, zusammen mit den Reaktionen 19, 20 und 16, würde sich für das Ozon eine „Nullrunde“ ergeben, es würde sowohl abgebaut als auch gebildet werden. Reaktion 24 gekoppelt mit Reaktion 22 würde allerdings einen Ozonabbau bedeuten.

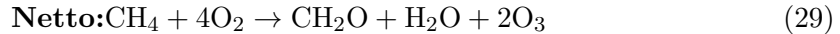
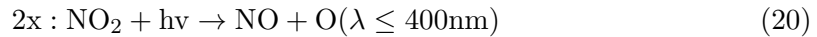
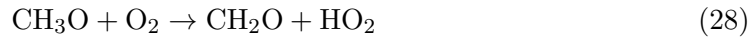
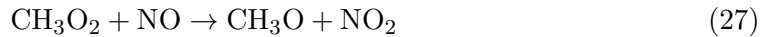
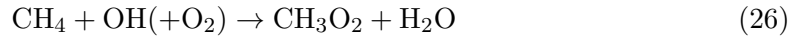
Ozon wird außerdem noch häufig durch die Reaktion mit NO abgebaut, was die Hauptquelle des schädlichen NO<sub>2</sub> darstellt:





Diese Reaktion gekoppelt mit den Reaktionen 20 und 16 bewirken wieder keine Ozonkonzentrationsveränderung, allerdings bewirkt diese Reaktion 25 die Reduktion der NO-Moleküle, wodurch weniger NO für die Ozonproduktion vorhanden ist [15].

Die Oxidationsreihen von Methan sind wesentlich komplexer als die von CO, hier soll aber trotzdem eine genauer angeführt werden. Auch hier spielt die NO-Konzentration eine ausschlaggebende Rolle. In NO-reicher Umgebung wird durch die Oxidation von Methan in wenigen Minuten Ozon und Formaldehyd gebildet:



Ist die NO-Konzentration zu gering, wird  $\text{CH}_4$  oxidiert, ohne dabei Ozon zu bilden. Allerdings werden die Konzentrationen der  $\text{OH}_x$ -Radikale beeinflusst, welche wiederum die Ozonkonzentration beeinflussen. Durch eine weitere Reaktionsfolge der Produkte der Methanoxidation kann es zur Bildung von CO kommen, welches wie oben besprochen reagieren kann. All diese Reaktionsfolgen beeinträchtigen die Konzentrationen der Oxidantien in der Atmosphäre [15].

Neben der Abhängigkeit von solarer Strahlung ist also die Konzentration der Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) der determinierende Faktor, ob es zu einer Ozonproduktion oder zu einem -abbau kommt. Generell kann man sagen, dass es mit genügend Sonneneinstrahlung in  $\text{NO}_x$ -reicher Umgebung zur Entstehung des  $\text{O}_3$  kommt, in  $\text{NO}_x$ -armer Umgebung zum Abbau. Außerdem reagieren die Stickoxide oft als Katalysatoren, das heißt, sie werden selbst nicht abgebaut oder produziert, beschleunigen, bzw. bestimmen allerdings die ablaufende chemische Reaktion. Auch die  $\text{HO}_x$ -Radikale werden häufig als Katalysatoren verwendet [15]. In den Nachtstunden, also bei ausbleibender Sonnenstrahlung, wirkt  $\text{NO}_x$  in umgekehrter Form und fördert den Ozonabbau.

## Der Weekend-Effekt

Wie bereits in der Einleitung und in Kapitel 2.4.1 angesprochen, kommt es trotz der verringerten Precursor-Emissionen an den Wochenenden zu erhöhten Ozonwerten [2, 9, 24, 31, 36].

Es gibt insgesamt drei mögliche Ursachen für den Weekend-Effekt [2]

- die geringe  $\text{NO}_x$ -Konzentration an den Wochenenden führt zu einem verringerten Abbau des Ozons,
- die am Wochenende zeitverzögerten  $\text{NO}_x$ -Emissionen erlauben eine effektivere Ozonproduktion,
- an Wochenenden steht mehr Sonnenlicht zur Verfügung, da es weniger Ruß in der Atmosphäre gibt,

wobei die gängigste und auch schon mehrmals bestätigte die erstgenannte ist, dass die Abnahme von  $\text{NO}_x$  an den Wochenenden den Abbau von Ozon vermindert. An den Werktagen kommt es vor allem in den Morgenstunden in verkehrsbelasteten Gebieten, wenn die Sonne noch nicht aufgegangen ist, der Verkehr jedoch schon zugenommen hat, zu einem raschen Abbau des Ozons durch NO. Auf Grund des niedrigeren Ausgangsniveaus steigen die Ozonwerte der Werktage nicht so stark an wie an den Wochenenden (Abbildung 11). Diese Reaktion (25) läuft sehr schnell ab und erfolgt daher lokal, wobei bei der Bildung von Ozon immer erst die Umwandlung von NO, welches direkt vom Verkehr emittiert wird, zu  $\text{NO}_2$  erfolgen muss (vgl. Reaktionsketten von CO und  $\text{CH}_4$ ) [14, 9]. Daher dominiert an verkehrsbelasteten Standorten der Abbau des Ozons, da die Bildung oft erst nach einem Weitertransport der Schadstoffe zustande kommt. Daher kann es an Stationen mit hohen Emissionsraten zum Weekend-Effekt kommen. Im ländlichen Raum hingegen findet man diesen Effekt nicht, da durch die geringen primären Schadstoffe auf Grund eines geringeren Verkehrsaufkommens die Abbaureaktion (Reaktion 25) kaum stattfindet [9].

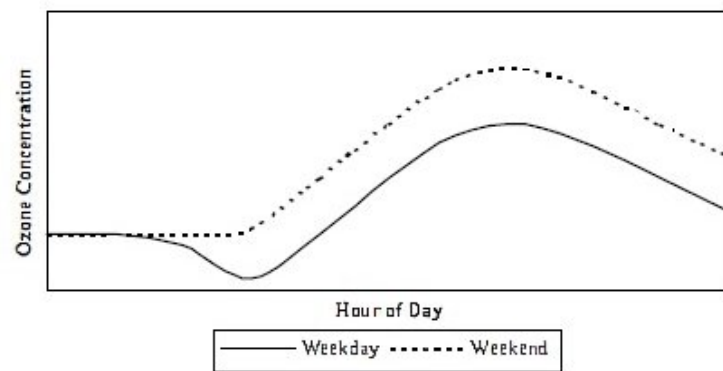


Abbildung 11: Schematische Darstellung des Unterschiedes der Tagesgänge von Werktagen (durchgezogene Linie) zu Wochenenden (gestrichelte Linie), auf Grund verstärkten Stoßverkehrs am Morgen [4]

## 4 Hypothesenbildung

Wie gerade besprochen, kommt es vor allem an verkehrsbelasteten Standorten zum so genannten „Weekend-Effekt“. Anhand des mittleren Tagesganges von Ozon kann man diesen Einbruch am Morgen an Werktagen und somit den Unterschied zum Verlauf an den Wochenenden gut erkennen (vgl. Abbildung 11). Beim Vergleich mit dem mittleren Tagesgang der Temperatur müsste ebenfalls ein Einbruch in den Morgenstunden zu verzeichnen sein, wenn die lokale Ozonkonzentration unmittelbaren Einfluss auf die Temperatur hat. Die in der Einleitung vorgestellte Studie konnte diesen Zusammenhang feststellen [4]. In dieser Arbeit soll dieselbe Annahme für Österreich getestet werden. Die Forschungshypothese bzw. erste Fragestellung lautet dementsprechend:

1. *Die Temperatur der Troposphäre wird durch das bodennahe Ozon entscheidend beeinflusst.*

Im Zuge der Analysen ergeben sich daraus noch weitere Fragestellungen, welchen in dieser Arbeit nachgegangen wird:

2. *Ist ein Ozon-Weekend-Effekt ersichtlich?*  
Nach Abschnitt 3.1.1 ist anzunehmen, dass es durch verstärkte anthropogene Tätigkeit an den Wochentagen zu erhöhten  $\text{NO}_x$ -Emissionen und somit zu einem stärkeren Ozonabbau in den Morgenstunden und damit geringeren Ozonwerten an Werktagen kommt. Somit lautet die  $H_0$ : Es ist kein Ozon-Weekend-Effekt erkennbar.
3. *Ist der Standort für die Ausprägung der Zusammenhänge ausschlaggebend?*  
Die  $H_0$  dazu lautet: Der Standort ist nicht ausschlaggebend für die Ausprägung der Zusammenhänge. Es soll gezeigt werden, dass regionale Gegebenheiten maßgeblich für das Ausmaß des Weekend-Effekts sind.
4. *Unterscheiden sich die wochentags und an Wochenenden gemessenen Ozonkonzentrationen in Wochen mit erhöhten Ozonniveaus signifikant voneinander?*  
Durch das vermehrte Ozonangebot sollte es zu deutlicheren Unterschieden von Werktags- und Wochenendozonwerten kommen. Dementsprechend lautet die  $H_0$ : Es gibt keinen signifikanten Unterschied zwischen Werktags- und Wochenendozonwerten bei Wochen mit erhöhtem Ozon.
5. *Zeigen Werktage in Wochen mit erhöhtem Ozon signifikant andere Temperaturen im Tagesverlauf als an Wochenenden?*  
Analog dazu kommt es auch bei der Temperatur durch das vermehrte Ozon in der Atmosphäre zu deutlicheren Unterschieden von Werktags- zu Wochenendtemperaturwerten. Dadurch lautet hier die  $H_0$ : Es gibt keinen signifikanten Unterschied zwischen Werktags- und Wochenendtemperaturwerten bei Wochen mit erhöhtem Ozon.

6. *Verhalten sich die Tagesgänge und Signifikanzen von Ozon und Temperatur ähnlich?*

Bei einem deutlichen Zusammenhang zwischen Ozon und Temperatur würde der strukturelle Verlauf der Tagesgänge dieser beiden Größen dieselben Merkmale aufweisen. Die  $H_0$  lautet daher: Die Tagesgänge von Ozon und Temperatur weisen keine Ähnlichkeiten auf.

7. *Ist die Ausprägung der Unterschiede abhängig vom verwendeten Schwellenwert?*

Für die Ausweisung von starken Ozonepisoden wird ein Schwellenwert verwendet. Im Zuge der Analyse soll auch gezeigt werden, ob die Variation dieses Wertes zu unterschiedlichen Ergebnissen führt. Die  $H_0$  lautet dementsprechend: Die Ausprägung eventueller Unterschiede ist nicht vom verwendeten Schwellenwert abhängig.

8. *Eignet sich die verwendete Methode für die Untersuchung der Haupthypothese?*

Die  $H_0$  lautet: Die verwendete Methode ist nicht für diese Fragestellung geeignet. Die hier verwendete Methode beruht auf einer Studie von BEANEY und GOUGH 2002, welche in Toronto, Kanada, durchgeführt wurde. Es soll erläutert werden, ob diese auch für die Fragestellung des thermischen Einflusses von Ozon auf die Temperatur geeignet ist oder ob andere Alternativen eine bessere Lösung darstellen würden.

Besonders der siebente Punkt, die Schwellenwertdiskussion, wird eine besondere Fragestellung darstellen, da damit gezeigt werden soll, dass dies ein ausschlaggebender Parameter im Bezug auf die Ausprägungen der Ergebnisse ist. Die kanadische Studie von Beaney und Gough 2002 hat mit der Wahl eines „beliebigen“ Schwellenwertes die Frage des passenden Schwellenwertes völlig ausgespart (vgl. [4]).

## 5 Analyse

### 5.1 Untersuchungsgebiet

Der Großraum Wien, im Osten Österreichs, ist durch seine regelmäßig hohen Ozonepisoden im Sommer für diese Analysen gut geeignet. Um auch den regionalen Einfluss und die Geographie miteinzubeziehen, wurden verschiedene Standorte mit unterschiedlichen geographischen Rahmenbedingungen gewählt. Anhand von Ozonbelastungskarten des Umweltbundesamtes aus dem Jahr 2003, dem „Rekordsommer“ der letzten Jahre, wurden 9 Stationen ausgesucht (Abbildung 12), welche regelmäßig hohe Ozonepisoden im Sommer aufwiesen - Forsthof, Gänserndorf, Hainburg, Illmitz, Mistelbach, Pillersdorf, Schwechat, Stockerau und Wiener Neustadt.

#### 5.1.1 Forsthof

„Forsthof am Schöpfl“ liegt südlich der Autobahn A1, etwa auf Höhe von Neulengbach in einem Nord-Süd verlaufenden Tal. Die vorherrschende Topographie um die Station (Seehöhe = 581m) ist das Hügelland. In unmittelbarer Umgebung befindet sich eine Wiese ohne Bäume oder Gebäude. In weiterer Nähe findet man Wald- und Wiesengebiet sowie ein paar einzelne Häuser. Die Station hat nur einen geringen Einfluss von Straßenverkehrsemissionen [58].

Politisch gehört Forsthof zur Gemeinde Brand-Laaben, welche jährlich ein Pendleraufkommen (Ein- und Auspendler) von 458 Erwerbstätigen und 122 Schülern und Studenten (Stand 2001) aufweist [59].



Abbildung 13: Forsthof [58]

Betreut wird die Station von der Niederösterreichischen Landesregierung. Neben Ozon werden derzeit Schwefeldioxid, Stickstoffmonoxid und -dioxid sowie die meteorologischen Parameter Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, relative Feuchte und Globalstrahlung gemessen [58].

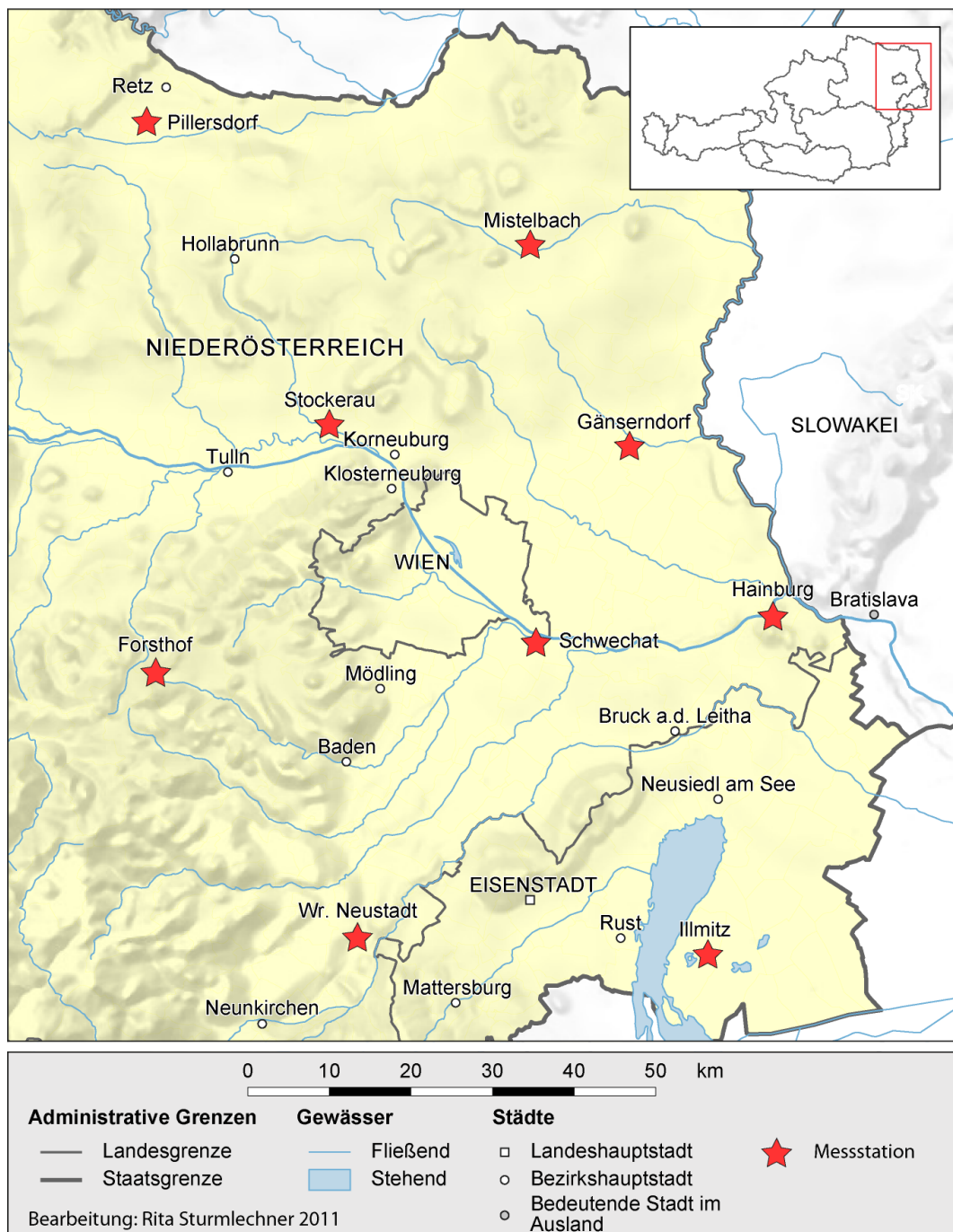


Abbildung 12: Übersicht der ausgewählten Stationen [[63], verändert]

### 5.1.2 Gänserndorf

Die Station „Gänserndorf Baumschulweg“, etwa 20km nordöstlich von Wien gelegen, befindet sich im topographisch ebenen Gebiet auf einer Seehöhe von 161m. In unmittelbarer Nähe gibt es eine Wiese mit Bäumen, ein Park- und Gartengebiet sowie eine wenig befahrene Innerorts-Straße. Durch die geringe Verkehrsbelastung ist auch der Einfluss von verkehrsbedingten Emissionen wenig. Die nächsten lokalen Gegebenheiten sind Ackerland und das Kleinstadt-Wohngebiet von Gänserndorf [58].



Abbildung 14: Gänserndorf [58]

Die Bezirkshauptstadt weist ein jährliches Pendleraufkommen von 5974 Erwerbstätigen und 1407 Schüler und Studenten auf [59].

Der Betreiber der Station ist auch hier die Niederösterreichische Landesregierung, welche neben Ozon die Messung von Schwefeldioxid, Stickstoffmonoxid und -dioxid, PM10, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, relative Feuchte und Globalstrahlung durchführt [58].

### 5.1.3 Hainburg

Eine weitere Station der Niederösterreichischen Landesregierung ist „Hainburg Krankenhaus“. Diese ist die östlichste Station dieser Untersuchung. Durch die Nähe zu Bratislava kann es durchaus zu einer Luftqualitätsbeeinflussung durch die slowakische Hauptstadt kommen, vor allem da die Station in einer Ebene zwischen Hügelländern im Süden und im Nordosten liegt, wodurch sich eine Art „Schneise“ nach Bratislava bildet. Die Station selbst ist durch die unmittelbare Nähe zu einem Parkplatz, einem Weingarten, einer Wiese mit Bäumen sowie einer wenig befahrenen Innerorts-Straße gekennzeichnet. In nächster Umgebung findet man Ackerland, das Kleinstadt-Wohngebiet von Hainburg, Wald und Wiesen. Der Einfluss des Straßenverkehrs ist hier ein geringer [58].



Abbildung 15: Hainburg [58]

Obwohl Hainburg weniger als 5000 Einwohner hat, weist es ein Pendleraufkommen von 2283 Erwerbstätigen und 454 Schülern und Studenten auf [59].



In Hainburg werden Schwefeldioxid, Stickstoffmonoxid und -dioxid, PM10, die Staubdeposition, Blei, Cadmium und weitere Metalle in der Staubdeposition, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, relative Feuchte, Globalstrahlung und natürlich Ozon gemessen [58].

#### 5.1.4 Illmitz

Die Station „Illmitz am Neusiedler See“ ist die einzige burgenländische Station bei dieser Untersuchung. Sie liegt im unbesiedelten Gebiet in einer Ebene unmittelbar am Neusiedler See und an angrenzendem Ackerland. In weiterer Umgebung findet man Weinärten sowie Wiesen ohne Bäume oder Gebäude. Dadurch, dass die Station in unbebautem Gebiet abseits größerer Straßen liegt, kommt es auch zu keinen verkehrsbedingten Emissionseinflüssen. Aus diesem Grund wird diese Station vom Umweltbundesamt als Hintergrundmessstation für das Immissionsgesetz Luft herangezogen. Neben Ozon misst das UBA in Illmitz außerdem Schwefeldioxid inklusive Tagesproben, Stickstoffmonoxid und -dioxid, Kohlenmonoxid, PM10, PM2,5 und PM1, verschiedene Stoffe im PM10 und der Staubdeposition, einige Werte zum Niederschlag sowie die meteorologischen Größen Windrichtung und -geschwindigkeit, Lufttemperatur, relative Feuchte, Globalstrahlung, Sonnenscheindauer, Luftdruck und Regenmenge [58].



Abbildung 16: Illmitz [58]

#### 5.1.5 Mistelbach

Die Station „Mistelbach Steinhübel“, im Weinviertel gelegen, befindet sich im Hügelland auf einer Seehöhe von 250m. Die unmittelbare Umgebung stellen Weingärten, Wiesen ohne Bäume oder Gebäude sowie eine wenig befahrene Außerorts-Straße dar. Das weitere Gebiet weist außerdem Ackerland und das Kleinstadt-Wohngebiet von Mistelbach auf. Da die Station nicht an einer stark befahrenen Straße gelegen ist, ist auch der Einfluss der Verkehrsemissionen nur gering [58].



Abbildung 17: Mistelbach [58]

Mistelbach hat bei einer Einwohnerzahl von 11017 (Stand 1.1.2010) [60] ein Pendleraufkommen von 6189 Erwerbstätigen und 1858 Schülern und Studenten [59].

Die Station wird von der Niederösterreichischen Landesregierung betrieben, welche die Messungen von Schwefeldioxid, Ozon, PM<sub>10</sub>, die Staubdeposition und vorhandene Metalle in dieser Staubdeposition, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, relative Feuchte und Globalstrahlung durchführt [58].

#### 5.1.6 Pillersdorf

Pillersdorf liegt zwischen den Gemeinden Retz und Pulkau im nordwestlichen Weinviertel nahe an der Tschechischen Grenze. Es ist somit die nördlichste untersuchte Station [60]. Der Standort der Station ist auf einer Hügelkuppe in der Ebene. In unmittelbarer Nähe findet man Weingärten und Wiesen ohne Bäume oder Gebäude. Die weitere Umgebung ist durch Ackerland sowie das Dorf-Wohngebiet von Pillersdorf bzw. der Gemeinde Zellerndorf gekennzeichnet [58].

Da die Gemeinde Zellerndorf nur um die 1000 Pendler zu verzeichnen hat [59] und die Station an keiner stark befahrenen Straße gelegen ist, gibt es kaum einen Einfluss von Verkehrsemissionen [58].



Abbildung 18: Pillersdorf [58]

„Pillersdorf bei Retz“ wird vom Umweltbundesamt betrieben und ebenfalls wie die Station „Illmitz am Neusiedlersee“ als Hintergrundstation für das Immissionsgesetz-Luft herangezogen. Neben Ozon werden noch Schwefeldioxid, Stickstoffmonoxid und -dioxid, PM<sub>10</sub> sowie die meteorologischen Parameter Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, relative Feuchte, Globalstrahlung, Sonnenscheindauer, Luftdruck und die Regenmenge gemessen [58].

#### 5.1.7 Schwechat

Die Station „Schwechat Sportplatz“ ist die Wien am nächst gelegene Station. Besonders interessant ist hier die weiträumige Umgebung, da der Flughafen, eine Raffinerie, Industrie- und Gewerbegebiete, Stadtgebiete sowie die Schnellstraße S1 und die Ostautobahn A4, aber auch Ackerland und Wald in der Nähe zu finden sind. Die Station selbst ist unmittelbar von einer mäßig befahrenen Innerortsstraße, einem Sportplatz, Wiesen ohne Bäume und von einer lockeren Bebauung umgeben [58].



Abbildung 19: Schwechat [58]

Durch die direkte Lage an einer mäßig befahrenen Innerortsstraße sowie der Nähe zur Autobahn und Schnellstraße kann auch das Pendlerverhalten im Zuge der Belastung durch Verkehrsemissionen eine Rolle spielen. Schwechat hat insgesamt 16352 Einwohner (Stand 1.1.2010) [60] und weist ein Pendleraufkommen von 24048 Erwerbstätigen und 1078 Schüler und Studenten auf, wobei es deutlich mehr Einpendler bei den Erwerbstätigen gibt [59].

Der Betreiber der Station - die Niederösterreichische Landesregierung - misst neben Ozon noch Schwefeldioxid, Stickstoffmonoxid und -dioxid, PM10, die Windrichtung, -geschwindigkeit und -bö, die Lufttemperatur, relative Feuchte sowie die Globalstrahlung [58].

#### 5.1.8 Stockerau

Die Station „Stockerau, Rudolf-Diesel-Straße“ befindet sich nordwestlich von Wien auf einer Seehöhe von 170m. Durch die Nähe zur Autobahn A22, welche lediglich 160m entfernt der Station liegt, ist ein Einfluss des Verkehrsbetriebes zu erwarten. Die unmittelbare lokale Umgebung ist eine Wiese mit Bäumen, ein Park sowie ein Garten. Außerdem befindet sich die Station im locker bebauten Gebiet von Stockerau an einer wenig befahrenen Innerorts-Straße. Das großräumigere Umfeld gliedert sich in Wald-, Wiesen-, Ackerland- sowie Kleinstadtgebiet. Topographisch gesehen befindet sich die Station in einer Ebene [58].



Abbildung 20: Stockerau [58]

Durch die Nähe zur Autobahn spielt auch das Pendlerverhalten eine große Rolle. Stockerau weist mit 8377 Erwerbstätigen und 1577 Schülern und Studenten (Stand 2001) ein relativ hohes Pendleraufkommen unter den Untersuchungsstationen auf [59].

Die Messstation wird von der Niederösterreichischen Landesregierung betreut. Gemessen werden derzeit neben Ozon, Stickstoffmonoxid und -dioxid, PM10, die Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Windbö sowie die Lufttemperatur [58].

### 5.1.9 Wiener Neustadt

Wiener Neustadt ist mit einer Einwohnerzahl von 40708 (Stand 1.1.2010) [60] die zweitgrößte Stadt Niederösterreichs und befindet sich etwa 50 km südlich der Bundeshauptstadt Wien. Die Station selbst befindet sich in der Ebene. Sie liegt in einem Parkgelände am Stadtrand, weiter weg findet man Ackerland und das Stadtgebiet selbst [58].

Mit 24895 Erwerbstätigen und 7479 Schülern und Studenten weist Wiener Neustadt das höchste Pendleraufkommen aller untersuchten Stationen auf [59]. Durch die Nähe zur Südautobahn A2 und Schnellstraße S4 wird es außerdem von „Wien-Pendlern“ beeinflusst.



Abbildung 21: Wiener Neustadt [58]

„Wiener Neustadt“ ist wiederum eine Station, welche der Niederösterreichischen Landesregierung obliegt. Hier werden Schwefeldioxid, Stickstoffmonoxid und -dioxid, Ozon, PM<sub>10</sub>, die Staubdeposition sowie deren Blei- und Cadmiumgehalt und die meteorologischen Größen Windrichtung, -geschwindigkeit und -bö, Lufttemperatur, relative Feuchte und Globalstrahlung gemessen [58].

## 5.2 Methodik

Für die Analyse des thermischen Einflusses des Ozons auf die Temperatur werden von den Monaten April bis August Episoden mit hohen Ozonwerten mit anderen verglichen, welche keine hohen O<sub>3</sub>-Werte aufweisen. Dabei wird nach einem Schwellenwert vorgegangen. Dieser soll Wochen, in denen der Durchschnittswert mindestens eines Tages diesen Wert überschreitet, ausweisen, um die Episoden mit hohen Ozonwerten abzugrenzen („Ereigniswochen“ [exc]<sup>2</sup>). Alle anderen Wochen sollten die Vergleichswerte, in denen keine hohen Ozonwerte vorkommen, liefern („normale Wochen“ [nex]<sup>3</sup>). Anschließend werden aus den Datensätzen die jeweiligen Stundenmittel (0 bis 23 Uhr) berechnet, um einen durchschnittlichen Tagesgang der Ereigniswochen und normalen Wochen zu erhalten. Um den anthropogenen Einfluss zu zeigen und die meteorologischen Verhältnisse außer Acht lassen zu können, werden die Werktage mit den Wochenenden verglichen. Somit entstehen insgesamt 4 einzelne Datensätze jeder Station - Werktage der Ereigniswochen [exc-wd], Wochenenden der Ereigniswochen [exc-we], Werktage der normalen Wochen [nex-wd] und Wochenenden der normalen Wochen [nex-we]<sup>4</sup>.

Statistische Parameter, Jahresmittelwerte, Jahres- und Tagesgänge sollen einen Überblick über die Struktur der einzelnen Datensätze geben. Da zum Großteil keine Nor-

<sup>2</sup>diese Abkürzung steht für die englische Bezeichnung „exceedence weeks“

<sup>3</sup>diese Abkürzung steht für die englische Bezeichnung „non-exceedence weeks“

<sup>4</sup>[wd] bzw. [we] stehen für die englischen Bezeichnungen „weekdays“ bzw. „weekends“

Tabelle 5: Die Limits der Schwellenwerte der untersuchten Stationen

<i>Station</i>	<i>Limit</i>
Forsthoﬀ	140 $\mu\text{gm}^{-3}$
Gänsersdorf	120 $\mu\text{gm}^{-3}$
Hainburg	130 $\mu\text{gm}^{-3}$
Illmitz	120 $\mu\text{gm}^{-3}$
Mistelbach	130 $\mu\text{gm}^{-3}$
Pillersdorf	130 $\mu\text{gm}^{-3}$
Schwechat	120 $\mu\text{gm}^{-3}$
Stockerau	110 $\mu\text{gm}^{-3}$
Wiener Neustadt	120 $\mu\text{gm}^{-3}$

malverteilung der Daten vorliegt, werden diese logarithmiert um anschließend mit Hilfe eines  $t$ -Tests die Signifikanz der Unterschiede der Werkstage zu den Wochenenden zu untersuchen, analog nach Beaney and Gough 2002 [4]. Da in der kanadischen Studie die Schwellenwertdiskussion völlig außer Acht gelassen wurde, wird hier dieser Vorgang abschließend mit verschiedenen Schwellenwerten wiederholt, um die Variation der Ergebnisse, abhängig der Höhe dieses Wertes zu zeigen. Als Limit für den Schwellenwert wurde eine Mindestanzahl von 5 Wochen in den Ereigniswochen-Datensatz festgelegt. Tabelle 5 zeigt das jeweilige Limit der untersuchten Stationen.

Da der  $t$ -Test eigentlich auf einer Normalverteilung basiert, sollte noch eine weitere statistische Untersuchung durchgeführt werden, welche nicht eine Normalverteilung als Voraussetzung hat. Darum wird in dieser Studie noch der Unterschied der Tagesamplituden in die Untersuchung miteinbezogen. Dafür wird die Differenz des Maximalwertes und des Minimalwertes der erstellten Durchschnittstagesgänge berechnet und wiederum Werkstage mit Wochenenden verglichen. Dies erfolgt für alle 4 Datensätze an allen 9 Stationen. Um nun die Zusammenhänge bzw. Unterschiede der einzelnen Datensätze darzustellen, wird in weiterer Folge der Quotient aus den Amplituden der Ereigniswochen und normalen Wochen berechnet.

Außerdem wird wie bei Beaney und Gough 2002 die maximale Differenz der Stundenmittelwerte von Werktagen zu den Wochenenden ermittelt. Dabei subtrahiert man die Werktagswerte von den Wochenendwerten:

$$\Delta O_{3[max]} = \text{Max}(O_{3[we]} - O_{3[wd]}) \quad (30)$$

bzw.

$$\Delta T_{[max]} = \text{Max}(T_{[we]} - T_{[wd]}) \quad (31)$$

Das jeweilige Maximum soll über die Größenordnung der Unterschiede Aufschluss geben. Da für diese Fragestellung besonders der Unterschied in den Morgenstunden relevant ist, wird bei dieser Rechnung das absolute Maximum (nicht der Betrag der Unterschiede) verwendet. Sowohl von Ozon als auch von der Temperatur wird diese Analyse durchgeführt.

Im Anschluss an alle Analysen werden noch Berechnungen mit dem Strahlungsantriebsmodell „libRadtran“ [37, 65] durchgeführt, um den möglichen Einfluss einer Ozonänderung auf die Temperatur zu modellieren.

Die Ozondaten wurden vom UBA<sup>5</sup> Wien, die Temperaturdaten von NUMBIS<sup>6</sup> Niederösterreich bzw. von der ZAMG<sup>7</sup> Wien zur Verfügung gestellt. Für die Analyse werden 10-Jahresmessreihen von Ozon an allen 9 Stationen sowie 10-Jahresmessreihen der Temperatur an 5 Stationen verwendet. Die Stationen Illmitz mit 4 Jahren bzw. die Stationen Retz (neben Pillersdorf), Schwechat und Wiener Neustadt mit 9 Jahren weisen einen verringerten Temperaturdatensatz auf. Für die Untersuchung ist der Zeitraum von 1. April bis 31. August relevant, welcher in unseren Breiten die photochemisch aktivste Periode darstellt (vgl. Abbildung 26).

### 5.3 Ergebnisse und Diskussion

Jahresmittelwerte sowie Jahres- und Tagesgänge der einzelnen Stationen wurden erstellt, um einen ersten Überblick über die Daten zu erhalten (Abbildungen 22 bis 31). In Österreich umfasst die photochemisch aktivste Periode die Zeitspanne von April bis August (vgl. Abbildung 26). Darum wurde die Untersuchung auf diese Monate beschränkt. Um Unterschiede der Mittelwerte des ganzen Jahres sowie des Untersuchungszeitraumes zu erfassen, wurden in einem ersten Schritt die Zeitreihen von Ozon und Temperatur für diese beiden Zeiträume verglichen.

Abbildung 22 zeigt die durchschnittliche O<sub>3</sub>-Konzentration der einzelnen Stationen, wobei die Station Forsthof die höchsten und die Station Stockerau die tiefsten Jahresmittelwerte aufweist. Besonders ins Auge sticht bei dieser Abbildung das Jahr 2003, welches durch einen extrem heißen Sommer (Abbildung 25) gekennzeichnet war, womit auch die Ozonwerte deutlich über dem Durchschnitt lagen. Auch im Mittel der Sommermonate (Abbildung 23) ist die Ozonkonzentration im Jahr 2003 deutlich am höchsten. Vergleicht man damit allerdings die Temperaturmittelwerte der Jahre 1999 bis 2008 (Abbildungen 24, 25), so erkennt man, dass lediglich in den Sommermonaten der 2003er Peak zu finden ist. Das bedeutet, dass im Jahr 2003 der Sommer extrem heiß war, der Winter aber auch ziemlich kalt gewesen sein muss und dass der Sommer vermutlich die ausschlaggebende Periode für die mittleren Ozonwerte sein könnte.

Im Gegensatz dazu zeigt das Jahr 2007, welches laut Abbildung 25 ebenfalls einen extrem heißen Sommer verzeichnete, einen nur vereinzelt und weniger stark ausgeprägten Ozonverlauf. Grund dafür könnte z. B. der unterschiedliche Bewölkungsgrad dieser beiden Jahre darstellen. Im 2002er Jahr findet man bei den Temperaturdaten ebenfalls

---

<sup>5</sup>Umweltbundesamt

<sup>6</sup>Niederösterreichisches Umwelt- Beobachtungs- und Informationssystem

<sup>7</sup>Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

einen Peak. Die Ozonwerte dieses Jahres weisen allerdings nur im gesamten Jahr einen leichten Anstieg auf.

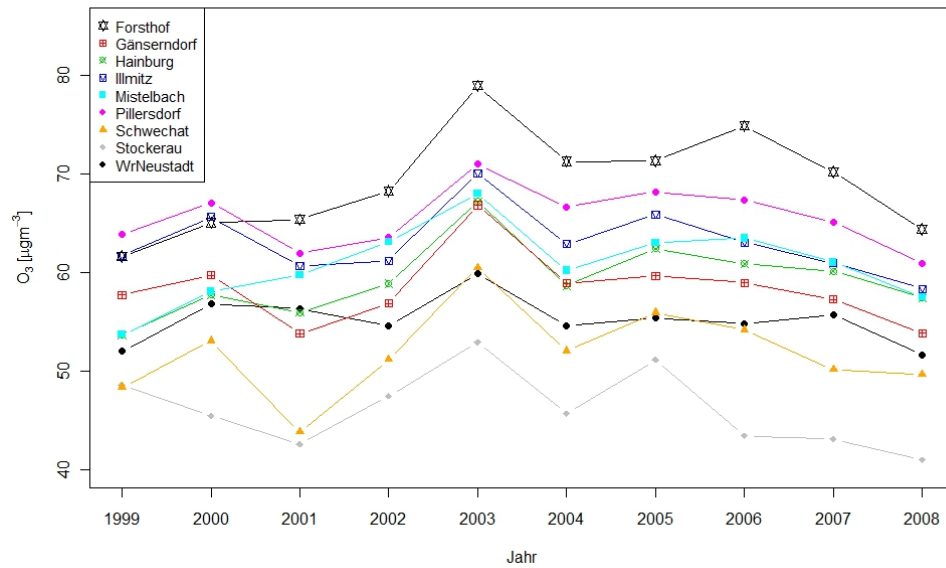


Abbildung 22: O<sub>3</sub>-Durchschnittskonzentrationen von 1999 bis 2008

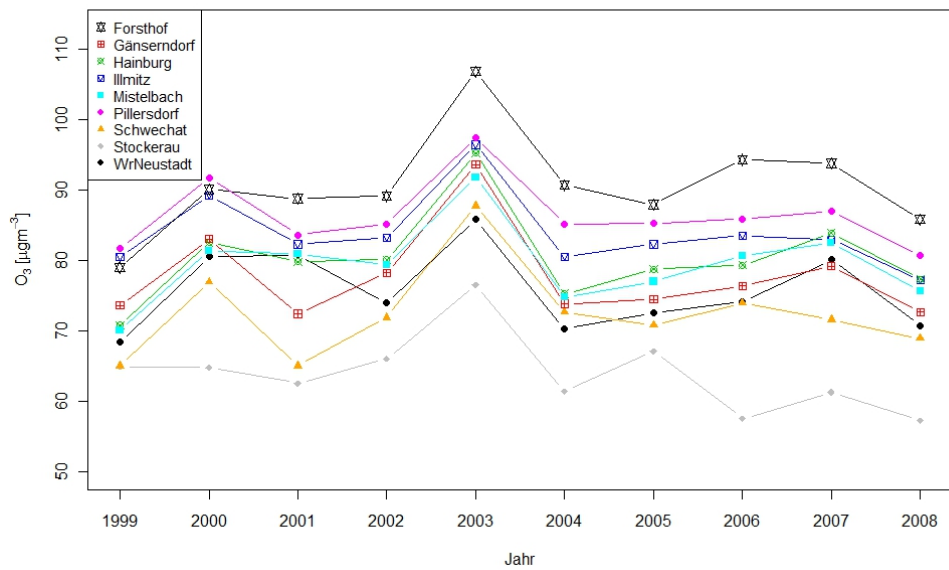


Abbildung 23: O<sub>3</sub>-Durchschnittskonzentrationen von 1999 bis 2008 für die Monate April bis August

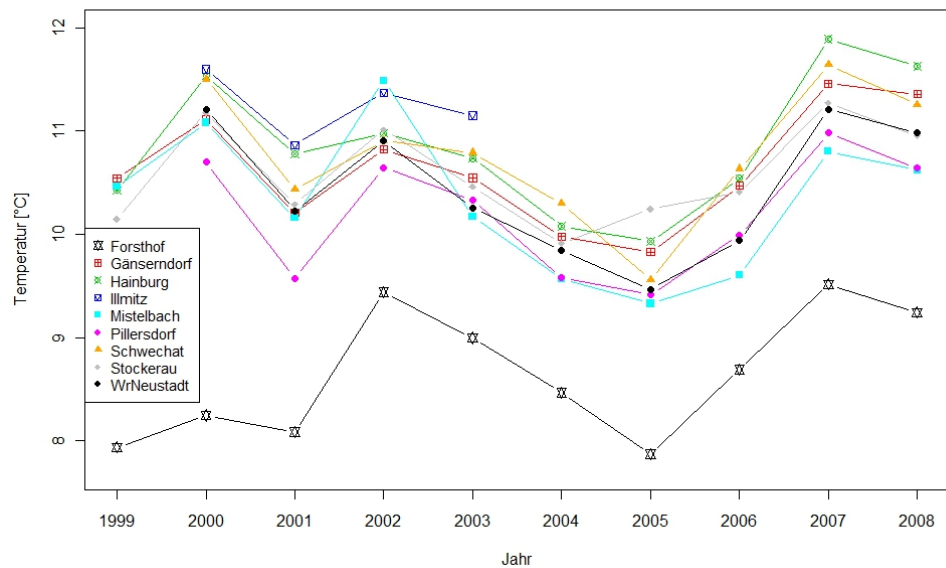


Abbildung 24: Durchschnittstemperaturen von 1999 bis 2008



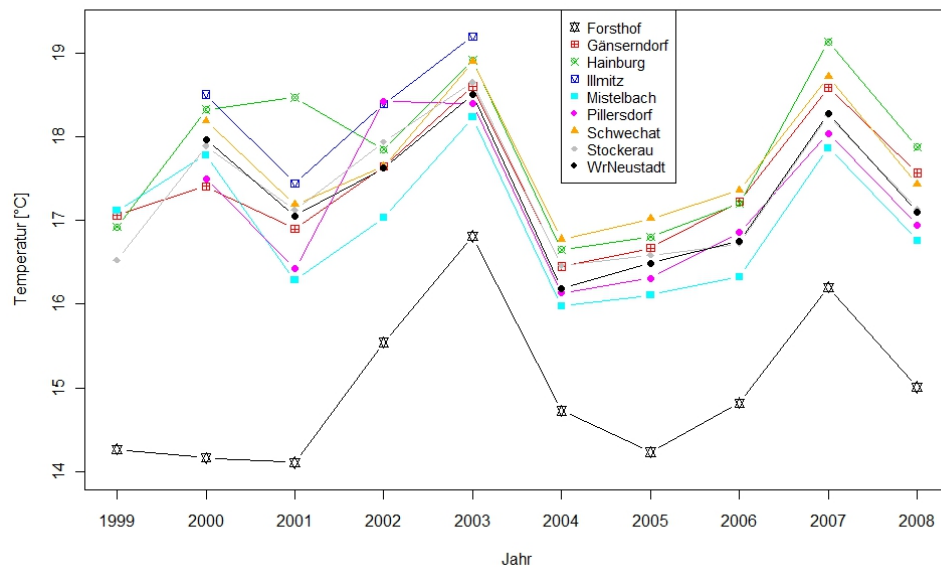


Abbildung 25: Durchschnittstemperaturen von 1999 bis 2008 für die Monate April bis August

Am Jahresgang des Ozons kann man sehr gut die Abhängigkeit der Ozonbildung von der Sonnenstrahlung bzw. der Temperatur erkennen. In den Sommermonaten, besonders im Zeitraum von Mai bis einschließlich Juli, im weiteren Sinne von April bis August, sind die Ozonproduktionsraten auf Grund der hohen Sonnenstrahlungsdauer und höheren Temperaturen am höchsten. Für die Entscheidung der Zeitspanne der verwendeten Daten war Abbildung 26 ausschlaggebend, um die photochemisch aktivste Zeitspanne in Österreich herauszufinden. Die Gleichläufigkeit der Kurven der einzelnen Stationen zeigt, dass diese Annahme für alle verwendeten Stationen gültig ist.

Die Temperatur zeigt einen ähnlichen, aber leicht verschobenen Jahresgang. Hier findet man die höchsten Werte zwischen Juni und August, der Mai und besonders der April weisen deutlich tiefere Temperaturen auf.

Aus dem Vergleich der beiden Jahresgänge könnte man annehmen, dass die Sonneneinstrahlung der determinierende Faktor für die Ozonbildung sei. Die Temperatur dürfte hierbei einen kleineren Einfluss haben.

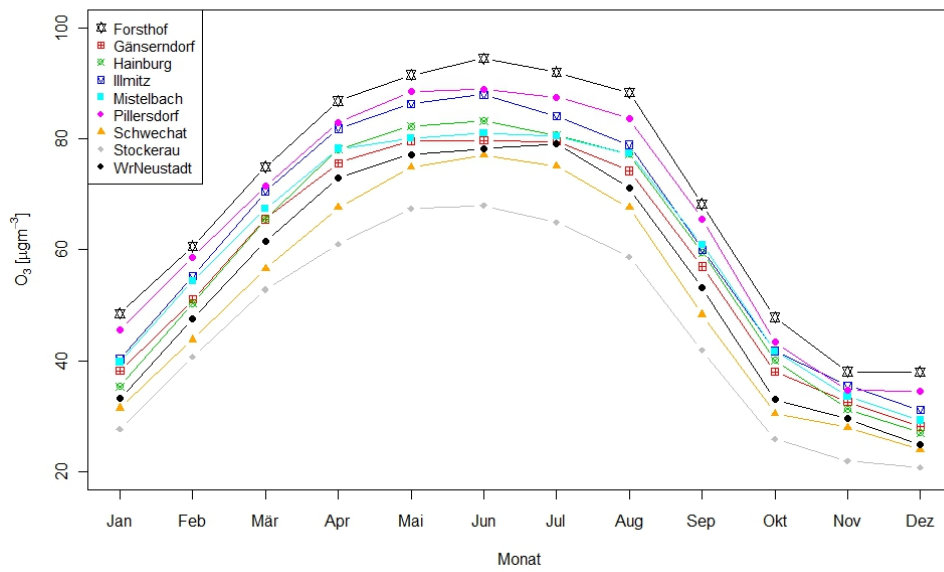


Abbildung 26: Der Jahresgang von Ozon an den untersuchten Stationen

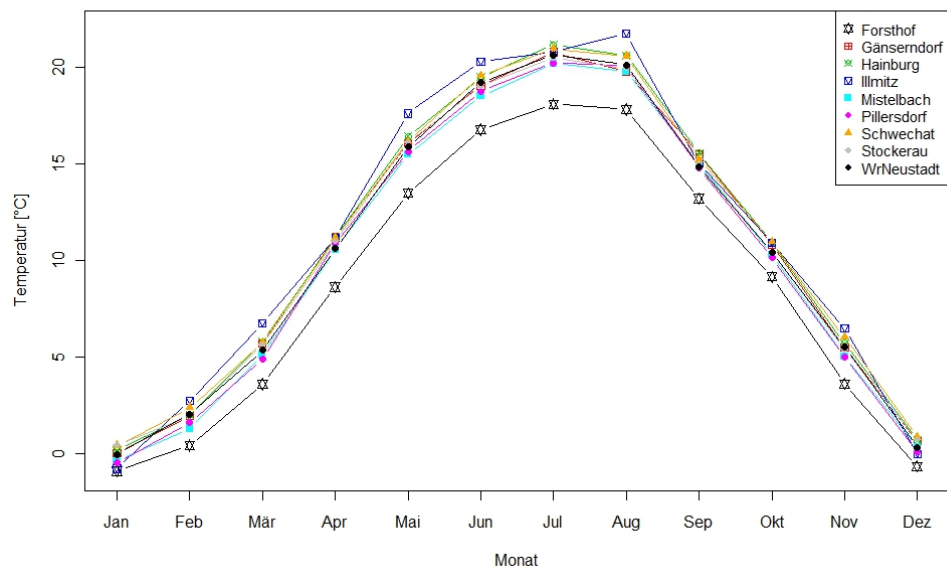


Abbildung 27: Der Temperaturjahresgang der untersuchten Stationen

Für diese Untersuchung ist besonders der Tagesgang von Ozon und Temperatur interessant. An den stark verkehrsbelasteten Standorten ist zu erwarten, dass durch das erhöhte Verkehrsaufkommen in den Morgenstunden an Werktagen ein beschleunigter Abbau des Ozons auf Grund des erhöhten  $\text{NO}_x$ -Angebotes und der noch fehlenden bzw. geringen Sonneneinstrahlung erfolgt.

Wie in Abbildung 28 erkennbar weisen die Stationen in ihren Tagesgängen teilweise große Unterschiede auf. Einerseits in der Amplitude (Ausprägung der Minima und Maxima) und andererseits in der Konzentrationsänderung in den Morgenstunden. Stationen wie Pillersdorf oder Illmitz weisen keinen verstärkten Abbau in den frühen Morgenstunden auf, Schwechat, Stockerau und Wiener Neustadt hingegen doch deutlich. Diese Unterschiede sind durch lokale Gegebenheiten bedingt. Schwechat, Stockerau und Wiener Neustadt sind vor allem durch die Nähe zur Autobahn und ein relativ starkes Pendleraufkommen [59] belastet.

Diese Stationsunterschiede sind auch in den Sommermonaten erkennbar (Abbildung 29). Neben den höheren Werten unterscheidet sich dieser Tagesgang aber auch durch einen breiteren Peak, der sich möglicherweise auf Grund der längeren Sonnenscheindauer ergibt. Außerdem beginnt der Anstieg der  $\text{O}_3$ -Konzentration etwas früher. Ein Grund dafür könnte der frühere Sonnenaufgang in den Sommermonaten sein. Auch in den frühen Morgenstunden ist ein stärkerer Abbau von Ozon erkennbar. Das könnte eine Folge der höheren Ausgangskonzentration sein, wodurch mehr Ozon vorhanden ist um mit den  $\text{NO}_x$ -Gasen zu reagieren.

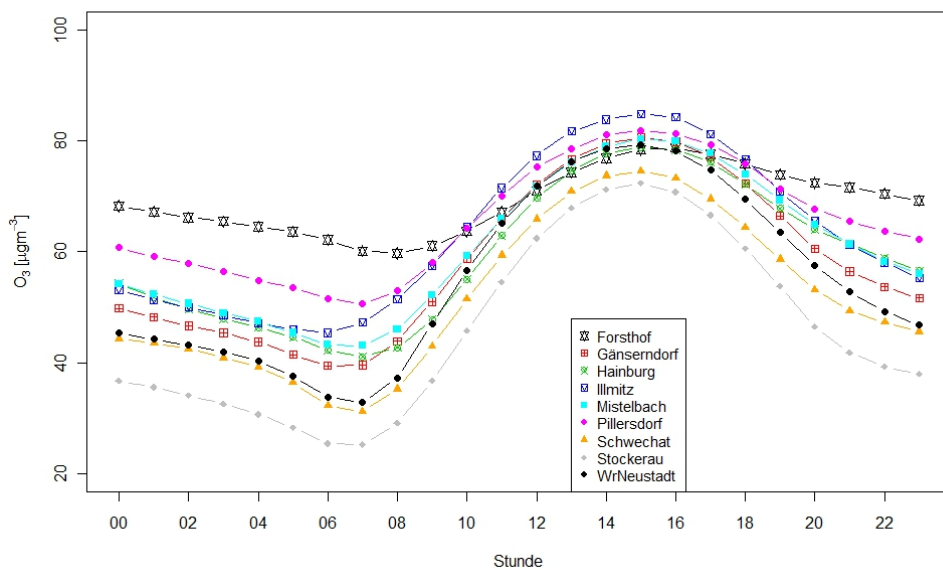


Abbildung 28: Der Tagesgang von Ozon an den untersuchten Stationen

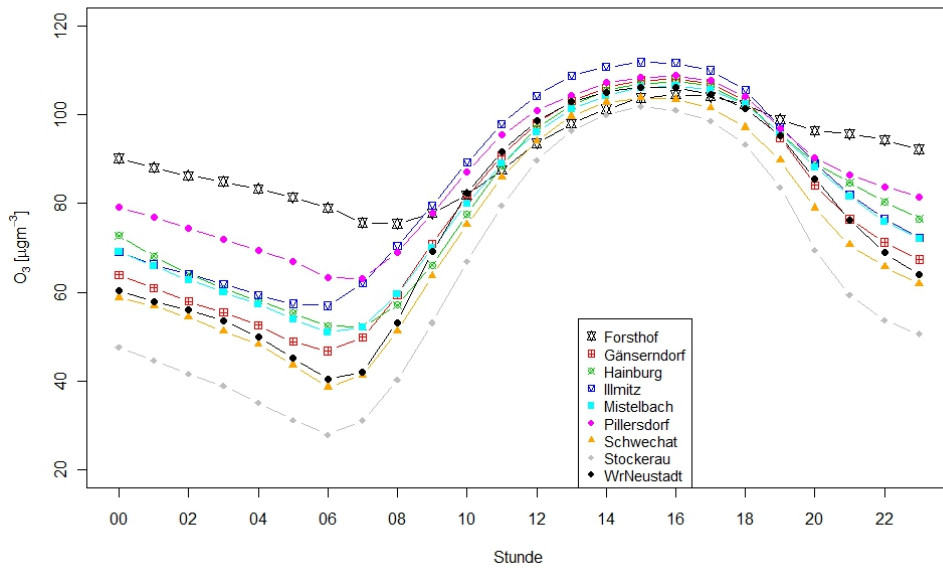


Abbildung 29: Der Tagesgang von Ozon an den untersuchten Stationen für die Monate April bis August

Einen sehr gleichmäßigen Verlauf weisen dagegen die Temperaturdaten auf (Abbildungen 30 und 31). Der Tagesgang der einzelnen Stationen unterscheidet sich kaum, lediglich in der Amplitude. Das ist vermutlich wiederum eine Folge der geographischen Gegebenheiten sowie der lokalen Emissionen. In den Sommermonaten bemerkt man sowohl höhere Werte als auch einen breiteren Peak durch das vermehrte Energieangebot. Zusätzlich kann man noch erkennen, dass die Erwärmung der Luft langsamer vorangeht, als die Abkühlung in den Abendstunden, was einen asymmetrischen Verlauf des Tagesganges mit sich bringt. Ein Einbruch der Temperatur in den Morgenstunden ist sowohl übers ganze Jahr gemittelt als auch über die Sommermonate April bis August nicht erkennbar.

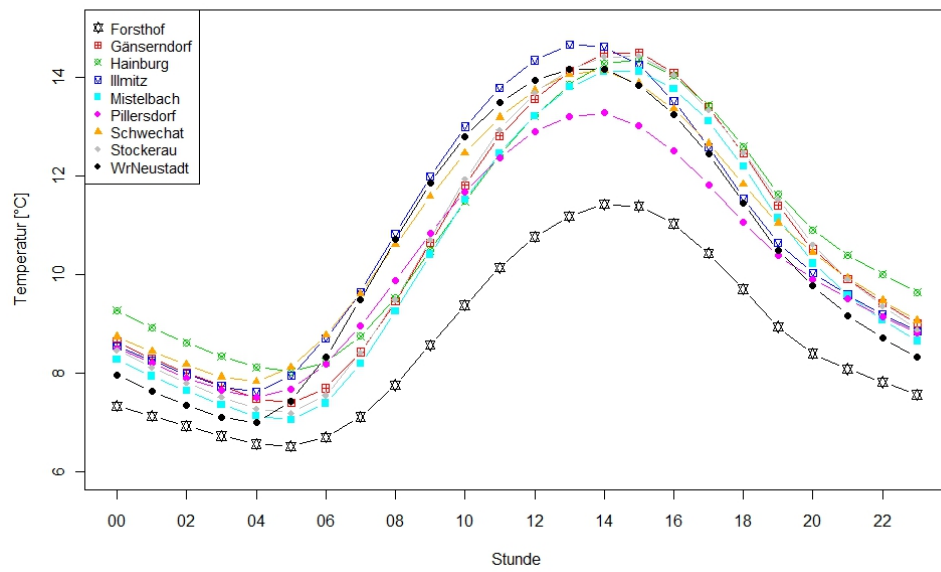


Abbildung 30: Der Temperaturtagesgang der untersuchten Stationen

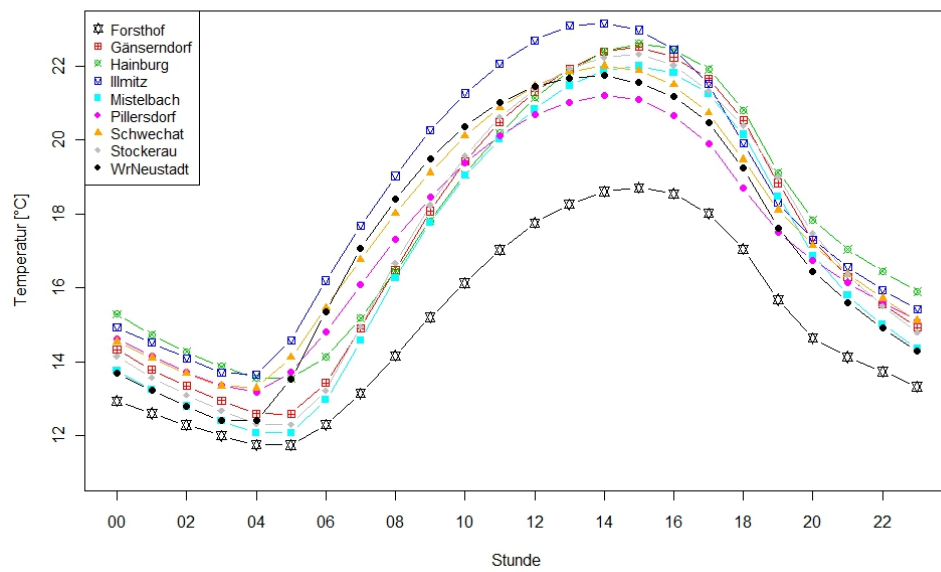


Abbildung 31: Der Temperaturtagesgang der untersuchten Stationen für die Monate April bis August

## Wochentagsunterschiede

Da für die Untersuchung Wochenendwerte mit Werktagswerten verglichen werden, soll hier ein Überblick über die Ozon- und Temperaturverteilung über die gesamte Woche mit jedem einzelnen Tag gegeben werden. Dabei kann man einen deutlichen Unterschied zwischen dem ganzen Jahr und dem Untersuchungszeitraum von April bis August feststellen. Im Verlauf des ganzen Jahres gibt es deutlich mehr Ozon an Wochenenden – der „Weekend-Effekt“ (siehe Abschnitt 3.1.1). An den Arbeitstagen (Montag bis Freitag) kann man von Dienstag bis Donnerstag einen Anstieg verzeichnen, Freitags ist der Ozonwert im Durchschnitt tiefer, bevor er zum Wochenende hin steigt (Abbildung 32).

In den Sommermonaten (Abbildung 33) kommt es schon ab Montag zu einem Anstieg der  $O_3$ -Werte bis Donnerstag. Der Einbruch am Freitag ist auch hier deutlich zu verzeichnen. Die Wochenendwerte sind nur noch teilweise erhöht – vor allem in Schwechat, Stockerau und Wiener Neustadt.

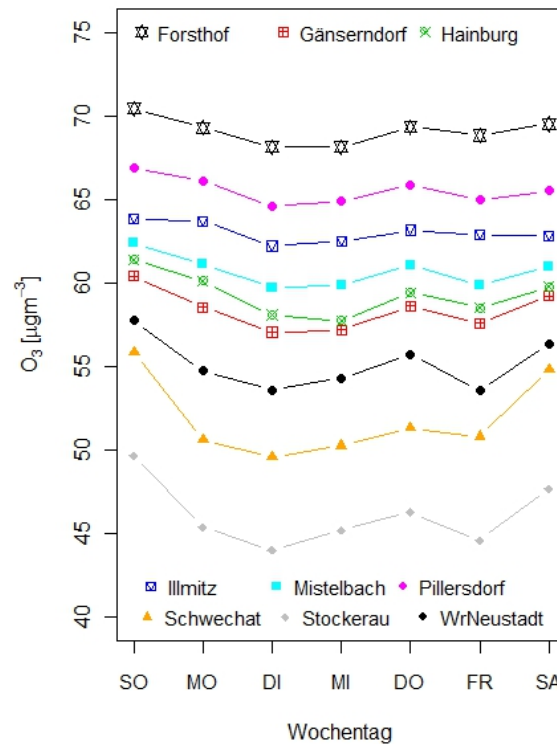


Abbildung 32: Ozonmittelwerte der einzelnen Wochentage der untersuchten Stationen

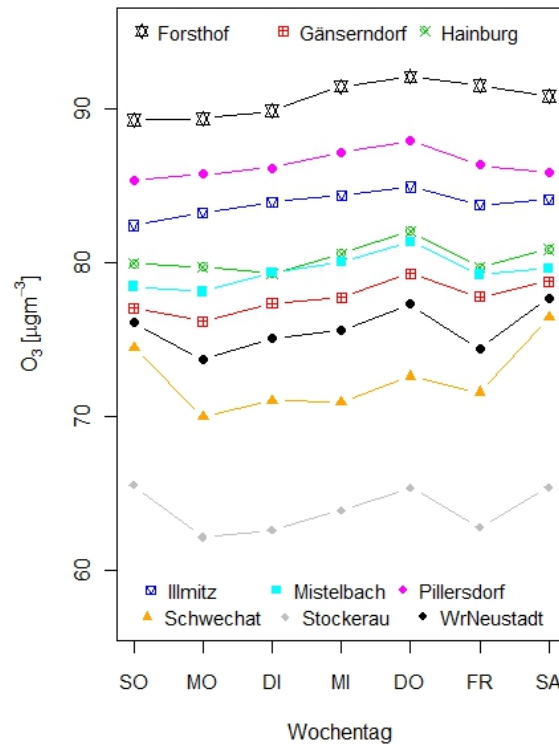


Abbildung 33: Ozonmittelwerte der einzelnen Wochentage der untersuchten Stationen für die Monate April bis August

Die Temperaturmittelwerte der Wochenenden, über das ganze Jahr gemittelt, sind im Gegensatz zu den Ozonwerten tiefer als an den Werktagen (Abbildung 34). Am auffallendsten ist hierbei der Anstieg von Sonntag auf Montag, welcher bei allen Stationen deutlich erkennbar ist. Auf diesen Anstieg folgt ein leichter Rückgang am Dienstag. Danach bleibt die Temperatur verhältnismäßig konstant um schließlich am Freitag deutlich abzusinken. In Illmitz steigt die Temperatur allerdings bis Dienstag an, bevor sich diese „Mulde“ bildet.

In den Sommermonaten sieht das Bild ähnlich aus (Abbildung 35), allerdings ist der Anstieg am Montag noch deutlicher ausgeprägt, wodurch der Montag der Tag mit dem eindeutig höchsten Wert ist. Dieser Anstieg zu Wochenbeginn könnte mit der Anreise zum Arbeitsort zusammenhängen. Es kommen somit mehr Schadstoffe in die Luft, die die Lufttemperatur beeinflussen können. Ozon dürfte hierbei aber nicht die tragende Rolle spielen (vgl. Abbildung 33).

Der Vergleich der Ozon- und Temperaturwerte der einzelnen Wochentage lässt bereits vermuten, dass der Einfluss des Ozons auf die Temperatur nicht maßgeblich ist.

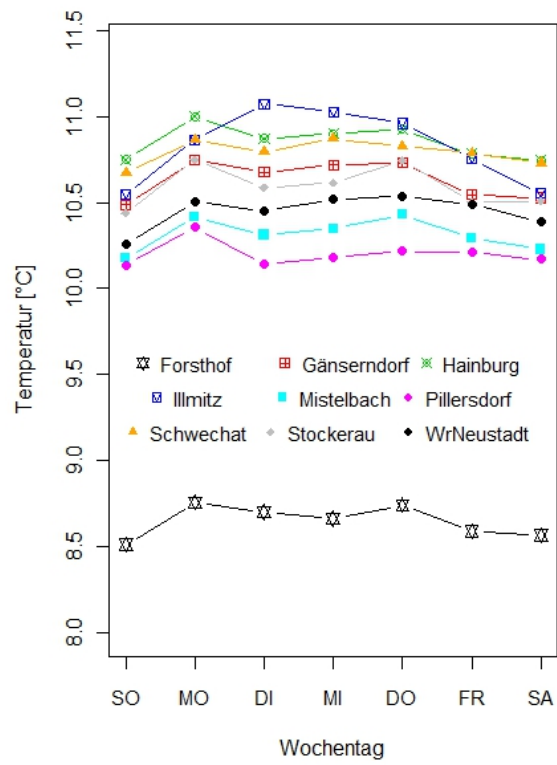


Abbildung 34: Temperaturmittelwerte der einzelnen Wochentage der untersuchten Stationen



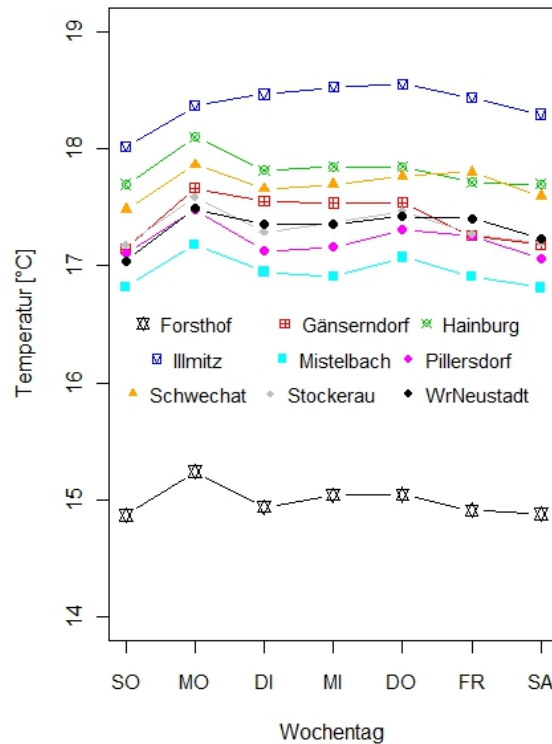


Abbildung 35: Temperaturmittelwerte der einzelnen Wochentage der untersuchten Stationen für die Monate April bis August

Die Tagesgänge der Monate April bis August wurden getrennt für die Werktag und Wochenenden erstellt (Abbildungen 36 bis 39). Bei Ozon ist an Werktagen besonders der Unterschied in den Morgenstunden erkennbar. Vor allem weisen die verkehrsbelasteten Stationen Schwechat, Stockerau und Wiener Neustadt einen beschleunigten Ozonabbau am Vormittag auf. An den Wochenenden gibt es diesen Einbruch nicht.

Der Tagesgang der Temperatur verläuft an Werktagen und Wochenenden sehr ähnlich. Lediglich der absolute Wert ist an Werktagen höher als an Wochenenden, was die Aussagen von den Abbildungen 34 und 35 bestätigt.

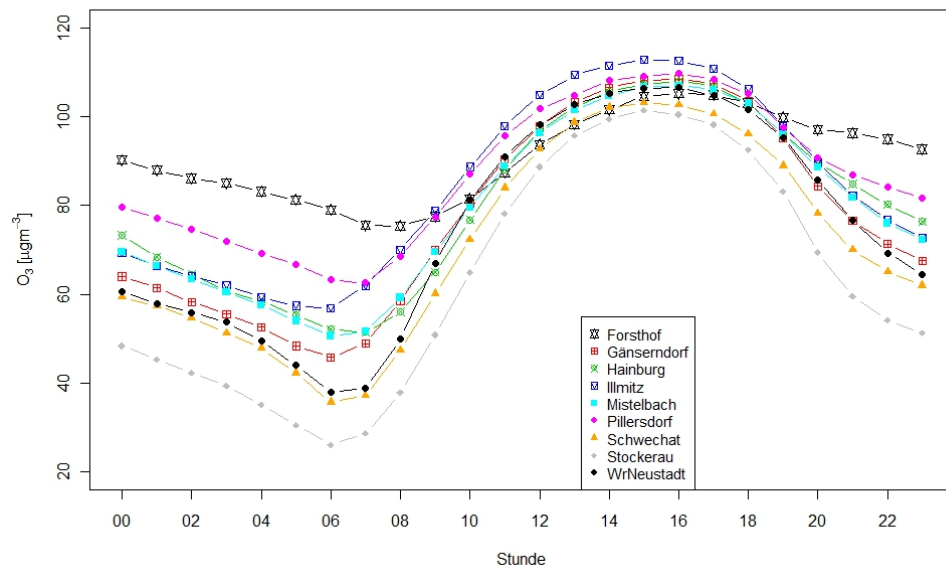


Abbildung 36: Ozontagesgang der untersuchten Stationen für die Monate April bis August an Werktagen

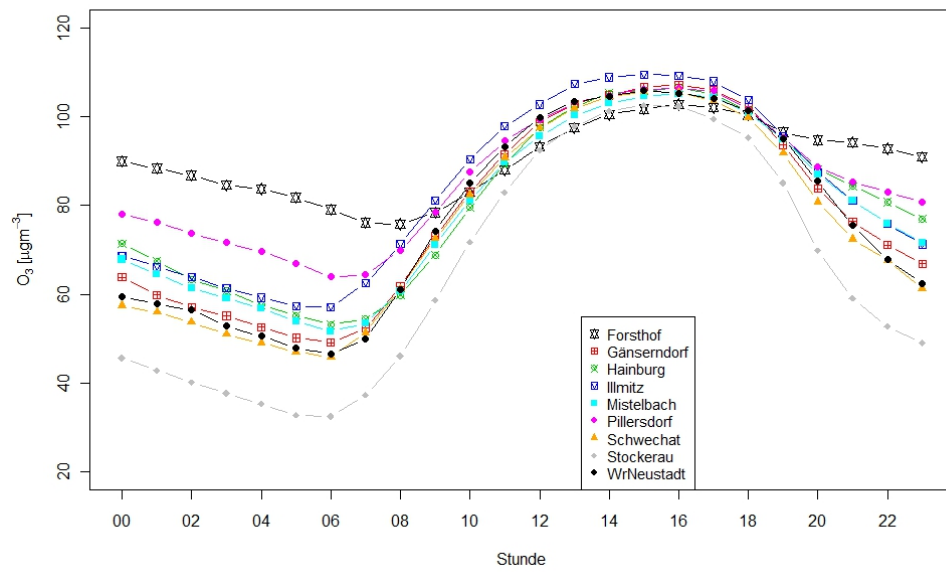


Abbildung 37: Ozontagesgang der untersuchten Stationen für die Monate April bis August an Wochenenden

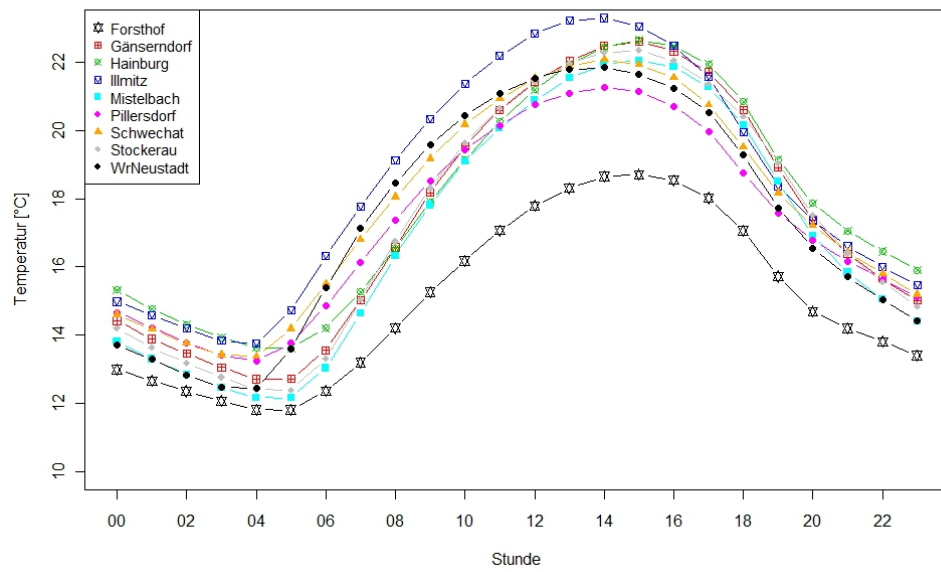


Abbildung 38: Temperaturtagesgang der untersuchten Stationen für die Monate April bis August an Werktagen

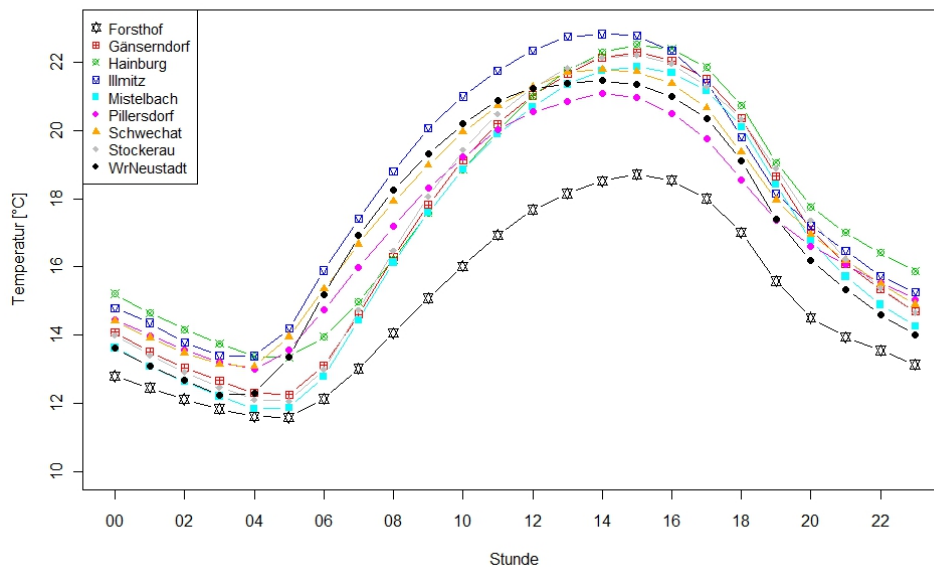


Abbildung 39: Temperaturtagesgang der untersuchten Stationen für die Monate April bis August an Wochenenden

Die Ergebnisse der nächsten Unterkapitel beziehen sich nur noch auf die untersuchten Monate April bis August. Die berechneten Datensätze basieren auf den Stundenmittelwerten dieser Zeitspanne.

### 5.3.1 Ozondaten

#### Statistische Parameter

Die statistischen Größen Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe und Wölbung sollen einen Überblick über den Datensatz geben, wie bereits die Abbildungen weiter oben.

Von den neun Stationen ist Forstthof die mit dem größten Mittelwert von  $90,7 \mu\text{gm}^{-3}$ . Stockerau hat den niedrigsten Wert von  $64,0 \mu\text{gm}^{-3}$ . Die restlichen Stationen liegen breit gefächert dazwischen. Forstthof hat außerdem die weitaus geringste Standardabweichung ( $9,4 \mu\text{gm}^{-3}$ ). Die anderen acht Stationen weisen mit Werten zwischen  $15,6 \mu\text{gm}^{-3}$  (Pillersdorf) und  $26,0 \mu\text{gm}^{-3}$  (Stockerau) sehr hohe Standardabweichungen auf. Das heißt, die einzelnen Werte der Datenreihe streuen sehr stark um den Mittelwert. Die Datenstruktur der Stationen ist bei den meisten Stationen rechtsschief, also mehr Werte liegen unter dem Mittelwert, außer in Forstthof mit einer leicht linksschiefen Verteilung, also mehr Werten über dem Mittelwert, und Wiener Neustadt, das eine beinahe neutrale Ausrichtung aufweist. Bei der Wölbung sind sich alle Datensätze sehr ähnlich. Sie weisen alle deutlich negative Werte (zwischen -1,37 und -1,64) auf, das heißt, sie haben im Vergleich zu einer Normalverteilung eine abgeflachte Datenverteilung.

Tabelle 6: Statistische Parameter der Ozondaten der untersuchten Stationen

<i>Station</i>	<i>Mittelwert [<math>\mu\text{gm}^{-3}</math>]</i>	<i>Standardabweichung</i>	<i>Schiefe</i>	<i>Wölbung</i>
Forsthof	90,7	9,4	-0,074	-1,37
Gänserndorf	77,7	21,7	0,105	-1,60
Hainburg	80,3	19,5	0,022	-1,56
Illmitz	83,9	20,0	0,126	-1,64
Mistelbach	79,4	19,4	0,053	-1,57
Pillersdorf	86,4	15,6	0,075	-1,50
Schwechat	72,4	22,4	0,096	-1,56
Stockerau	64,0	26,0	0,195	-1,60
Wr. Neustadt	75,7	23,2	-0,001	-1,62

### Werktags-/Wochenendunterschiede

Die Abbildungen 40 bis 46 sind Beispiele für die Tagesgänge von Ozon in Ereigniswochen und normalen Wochen. Werktage und Wochenenden werden im Diagramm getrennt dargestellt. Die Gesamtheit der Tagesgänge aller Stationen befindet sich im Anhang.

Werden alle Stationen verglichen, kann man an den Tagesgängen erkennen, dass das Ozonminimum der jeweiligen Tagesgänge zwischen 6 und 7 Uhr morgens (ausgenommen Forsthof mit einem Ozonminimum um 8 Uhr morgens), das Maximum zwischen 15 und 16 Uhr abends liegt. Ereigniswochen und normale Wochen unterscheiden sich bei den Maxima und Minima nur selten, ebenso wie Werktage und Wochenenden. Außerdem sieht man, dass in Ereigniswochen die Werktage, in normalen Wochen hingegen die Wochenenden höhere Ozonwerte aufweisen. Die normalen Wochen weisen außerdem geringe Unterschiede zwischen Werktags- und Wochenendtagesgang auf. Der Verlauf bei Ereigniswochen ist meist sichtbar verschieden. Die Amplitude der Ereigniswochen ist meist größer als die der normalen Wochen. Auffallend ist auch noch die Abhängigkeit der Unterschiede vom gewählten Schwellenwert. Besonders bei den Ereigniswochen ist an den meisten Stationen ein Anstieg der Unterschiede von Werktagen zu Wochenenden mit steigendem Schwellenwert erkennbar.

Von den neun untersuchten Stationen weisen Gänserndorf, Hainburg und Mistelbach einen leichten Einbruch des Ozonwertes in den Morgenstunden an Werktagen während Ereigniswochen auf. Bei Schwechat, Stockerau und Wiener Neustadt ist dieser deutlicher ausgeprägt (Abbildungen 40 bis 42). In Wiener Neustadt findet man diesen raschen Ozonabbau auch in den Morgenstunden in normalen Wochen. Der Grund für den Einbruch am Morgen liegt wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben, an den bereits vorhandenen  $\text{NO}_x$ -Emissionen vom Verkehr und der noch nicht bzw. kaum auftretenden Sonneneinstrahlung. Bei den Stationen Forsthof, Illmitz und Pillersdorf kann man keinen auffällig

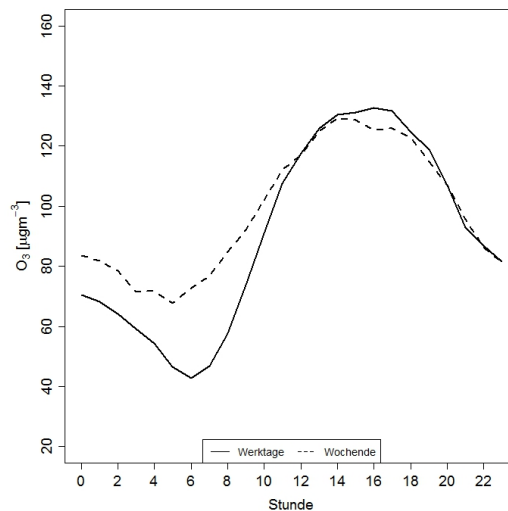


Abbildung 40: Der mittlere Ozontagesgang der Station Schwechat in Ereigniswochen, bei einem Schwellenwert von  $110 \mu\text{gm}^{-3}$ , unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie)

verstärkten Ozonabbau am Morgen erkennen.

In Stockerau, Pillersdorf und Illmitz kommt es am Nachmittag an Werktagen außerdem zu einem zeitlich sehr engen Maximum. Dieses könnte, zumindest bei den nordwestlich gelegenen Stationen Stockerau und Pillersdorf, durch die „Abgasfahne“ der Großstadt verursacht sein. In Illmitz spielt möglicherweise das lokale Klima eine bedeutende Rolle.

Um die Größenordnung der Unterschiede von Wochentagen zu Wochenenden zu erfassen, wurde die jeweils größte Differenz der Ozonstundenmittelwerte herangezogen. Die Werktagsozonwerte wurden von den Wochenendozonwerten subtrahiert und danach das jeweilige Maximum erfasst. Dies wurde sowohl für die Ereigniswochen als auch für die normalen Wochen durchgeführt (Tabelle 7). Für die Verifizierung der aufgestellten Hypothese sollten nun die maximalen Differenzen der Ozonmittelwerte in den Ereigniswochen größer als die der normalen Wochen sein. Wie in Tabelle 7 erkennbar, ist das vor allem mit steigendem Schwellenwert der Fall. Besonders weisen die vorher bereits erwähnten Stationen Schwechat, Stockerau und Wiener Neustadt diese Eigenschaft auf. Schwechat hat außerdem die größte maximale Differenz von  $43,3 \mu\text{gm}^{-3}$  zu verzeichnen (bei einem Schwellenwert von  $110 \mu\text{gm}^{-3}$ ). In Forsthoof und Pillersdorf ist es jeweils zwei Mal der Fall, dass die Werktagswerte den ganzen Tagesgang über den Wochenendwerten liegen – daher die negativen Werte in Tabelle 7.

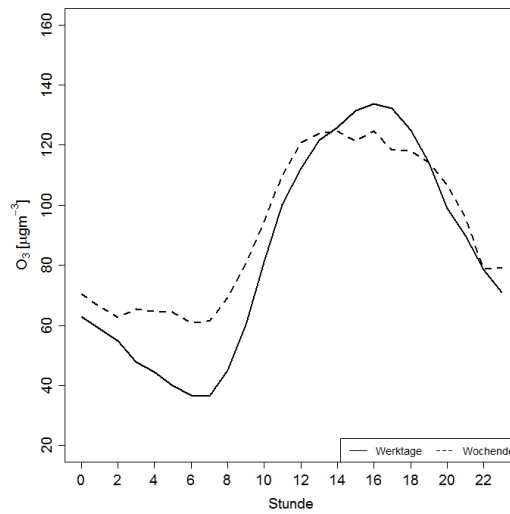


Abbildung 41: Der mittlere Ozontagesgang der Station Stockerau in Ereigniswochen, bei einem Schwellenwert von  $110 \mu\text{g m}^{-3}$ , unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie)

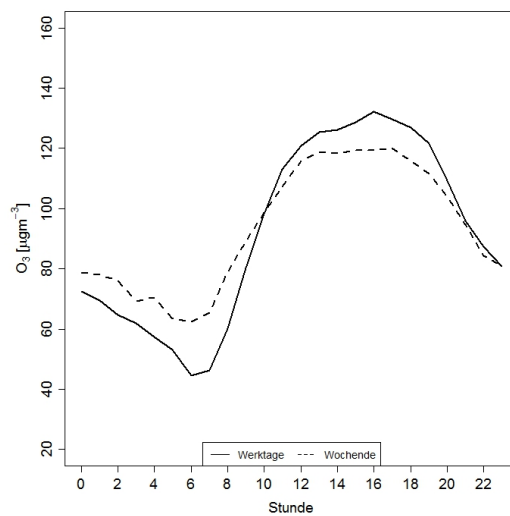


Abbildung 42: Der mittlere Ozontagesgang der Station Wiener Neustadt in Ereigniswochen, bei einem Schwellenwert von  $110 \mu\text{g m}^{-3}$ , unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie)



Tabelle 7: Maximale Ozondifferenz ( $\mu\text{gm}^{-3}$ ) von Werktagen und Wochenenden der untersuchten Stationen, nach Ereigniswochen (exc) und normalen Wochen (nex) unterschieden (Wochenende minus Werktage)

	$80 \mu\text{gm}^{-3}$		$90 \mu\text{gm}^{-3}$		$100 \mu\text{gm}^{-3}$		$110 \mu\text{gm}^{-3}$		$120 \mu\text{gm}^{-3}$		$130 \mu\text{gm}^{-3}$		$140 \mu\text{gm}^{-3}$	
<i>Station</i>	<i>exc</i>	<i>nex</i>	<i>exc</i>	<i>nex</i>	<i>exc</i>	<i>nex</i>	<i>exc</i>	<i>nex</i>	<i>exc</i>	<i>nex</i>	<i>exc</i>	<i>nex</i>	<i>exc</i>	<i>nex</i>
Forsthof	1,55	4,86	1,54	6,49	1,40	2,90	3,02	2,00	-2,02	4,01	1,50	2,27	-5,38	2,37
Gänserndorf	4,07	2,46	3,85	4,67	7,92	3,33	13,6	2,92	17,9	3,05				
Hainburg	3,95	4,07	4,16	2,92	5,35	3,91	7,08	3,68	7,48	4,26	4,13	4,16		
Illmitz	2,51	4,44	2,82	1,77	3,82	4,44	6,71	4,27	6,92	2,96				
Mistelbach	2,15	8,90	2,04	5,51	3,17	3,04	6,59	2,06	8,75	1,98	15,46	1,86		
Pillersdorf	1,68	7,17	2,28	3,09	1,81	2,59	1,40	2,51	-0,04	2,46	-6,09	2,11		
Schwechat	15,8	10,9	16,4	12,4	19,2	12,7	30,0	12,5	43,3	13,6				
Stockerau	9,59	8,21	13,1	6,83	17,5	7,40	25,1	7,90						
Wr. Neustadt	12,4	4,80	13,8	6,93	14,4	10,2	19,1	10,3	19,7	11,0				

Um die Unterschiede der Wochenenden zu den Werktagen auf ihre statistische Signifikanz zu testen, wurde ein  $t$ -Test durchgeführt. Da die Datensätze kaum eine Normalverteilung aufweisen, wurden sie zuvor logarithmiert. Keine Station wies bei den Schwellenwerten von 80, 90, 100 und 110  $\mu\text{gm}^{-3}$  eine statistische Signifikanz auf dem 0,05-Niveau auf. Die Unterschiede in Forsthof waren bei einem Schwellenwert von 120  $\mu\text{gm}^{-3}$  und 140  $\mu\text{gm}^{-3}$  signifikant, in Schwechat bei 120  $\mu\text{gm}^{-3}$  und in Pillersdorf bei 130  $\mu\text{gm}^{-3}$ , jeweils in Ereigniswochen (Abbildungen 43 bis 46).

Besonders interessant ist an diesen Ergebnissen die Veränderung des  $p$ -Werts des  $t$ -Tests mit steigendem Schwellenwert. Die Abbildungen 47 und 48 stellen diese graphisch dar. Dabei ist deutlich erkennbar, dass in Ereigniswochen die Signifikanzen mit steigendem Schwellenwert zunehmen. Bis zu dem 100- $\mu\text{gm}^{-3}$ -Schwellenwert scheint es keinen Unterschied zu geben, mit Ausnahme der Station Stockerau, welche allerdings von generell geringen Ozonwerten ausgeht (siehe oben). Danach ist der Trend an fast allen Stationen zu verzeichnen, bis hin zur Signifikanz der oben genannten Stationen. Die  $p$ -Werte der normalen Wochen weisen hingegen einen einheitlichen Wertebereich zwischen 0,45 und 1 auf (Abbildung 48).

Bei genauerer Betrachtung der mittleren Tagesgänge der signifikanten Ergebnisse kann man erkennen, dass die Signifikanz vermutlich auf Grund der Nachmittagsunterschiede zustande kommt. In Pillersdorf (Abbildung 46) und Forsthof (Abbildungen 43 und 44) wird also an Werktagen während der Sonnenstunden mehr Ozon als an den Wochenenden produziert, außer im Fall der Station Schwechat (Abbildung 45). Bei einem Schwellenwert von 120  $\mu\text{gm}^{-3}$  in Ereigniswochen sieht man besonders in den Morgenstunden einen großen Unterschied zwischen Werktagen und Wochenenden. Hier kann die Grundannahme, dass es durch vermehrte anthropogene Tätigkeit an Werktagen zu einem höheren  $\text{NO}_x$ -Angebot und somit zu einem beschleunigten Ozonabbau in den

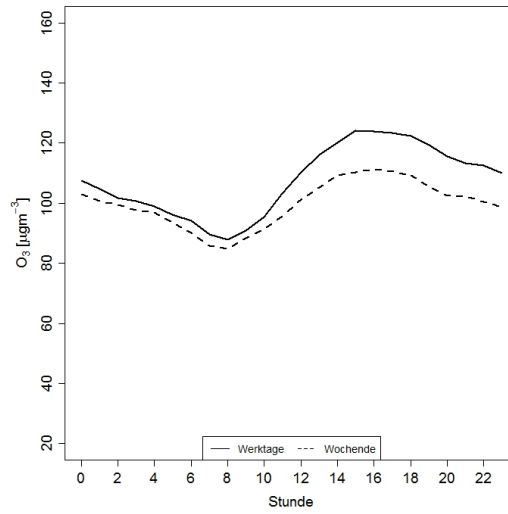


Abbildung 43: Der mittlere Ozontagesgang der signifikanten Station Forsthof in Ereigniswochen, bei einem Schwellenwert von  $120 \mu\text{gm}^{-3}$ , unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie)

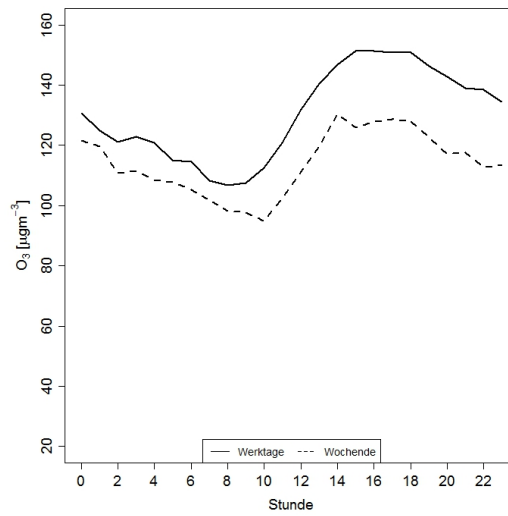


Abbildung 44: Der mittlere Ozontagesgang der signifikanten Station Forsthof in Ereigniswochen, bei einem Schwellenwert von  $140 \mu\text{gm}^{-3}$ , unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie)

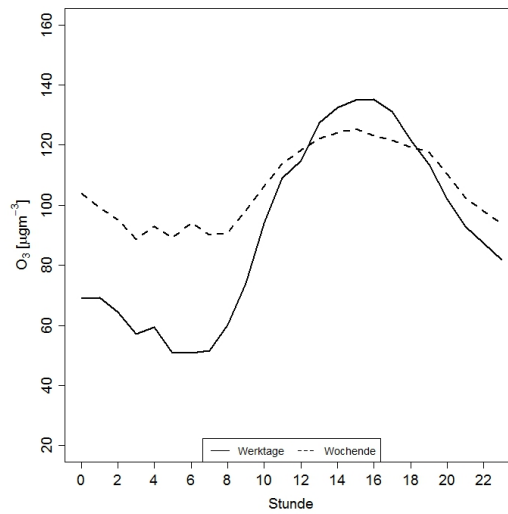


Abbildung 45: Der mittlere Ozontagesgang der signifikanten Station Schwechat in Ereigniswochen, bei einem Schwellenwert von  $120 \mu\text{gm}^{-3}$ , unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie)

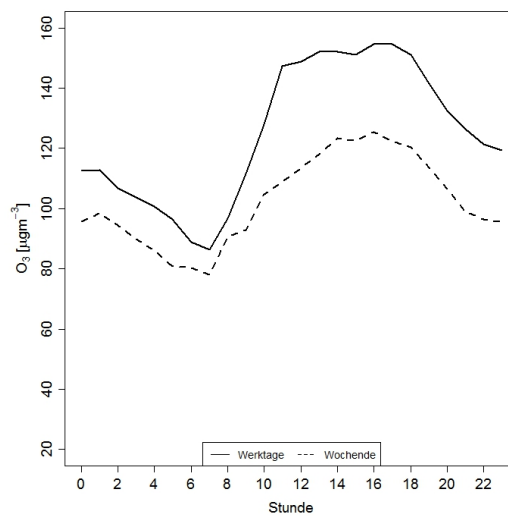


Abbildung 46: Der mittlere Ozontagesgang der signifikanten Station Pillersdorf in Ereigniswochen, bei einem Schwellenwert von  $130 \mu\text{gm}^{-3}$ , unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie)

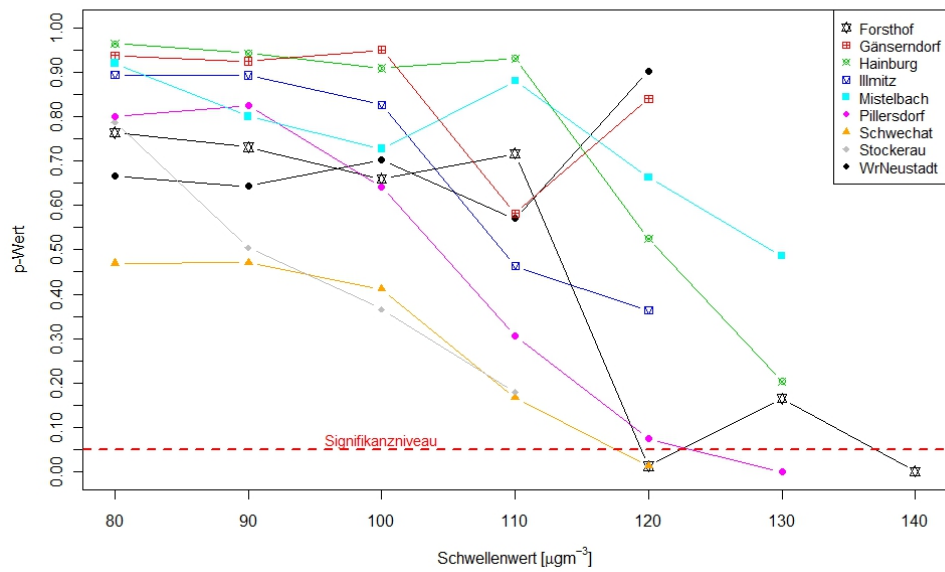


Abbildung 47: Die Veränderung des p-Wertes mit steigendem Schwellenwert bei Ereigniswochen von Ozon [eigene Darstellung]

Morgenstunden kommt (vgl. Abschnitt 3.1.1), angenommen werden. Der mittlere Tagesverlauf der Werktag dieser Station weist eine wesentlich höhere Amplitude als der der Wochenenden auf. Also wird an den Werktagen mehr Ozon produziert als abgebaut.

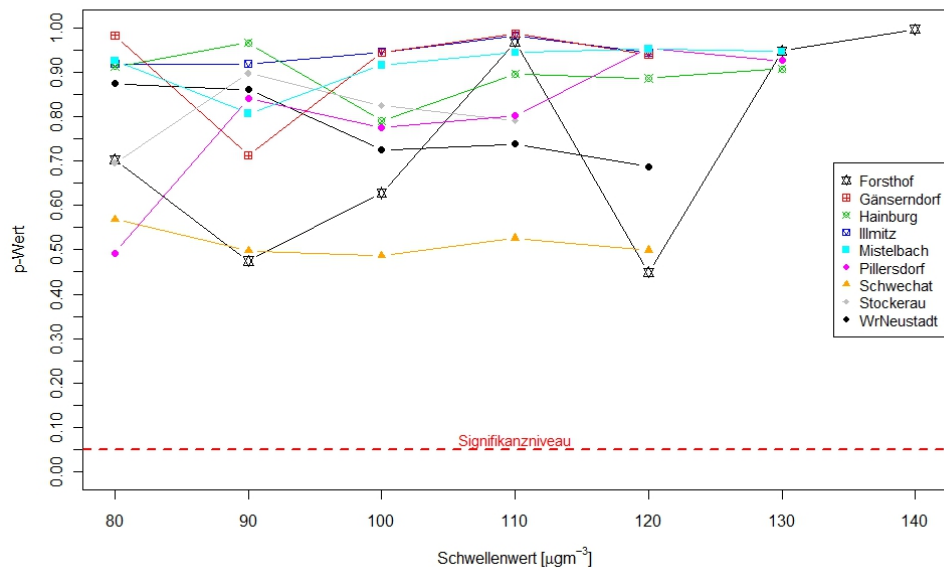


Abbildung 48: Die Veränderung des p-Wertes mit steigendem Schwellenwert bei normalen Wochen von Ozon [eigene Darstellung]

### 5.3.2 Temperaturdaten

#### Statistische Parameter

Für die Temperaturdatensätze soll mit den Größen Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe und Wölbung ebenfalls ein Überblick geschaffen werden.

Wie auch in Abbildung 24 erkennbar, weist Illmitz die höchsten Temperaturwerte (18,4 °C) und Forstthof die niedrigsten (15,0 °C) auf. Auch im Hinblick auf die Temperatur weist Forstthof mit einer Standardabweichung von 2,47 °C die geringste Streuung um den Mittelwert auf. Die der anderen Stationen liegen zwischen 2,80 °C (Pillersdorf) und 3,62 °C (Stockerau). Bei der Temperatur streuen die Werte allerdings nicht so stark wie bei Ozon. Bis auf Wiener Neustadt weisen alle Temperaturdatensätze der Stationen eine rechtsschiefe Verteilung auf. Ihre Werte liegen also vermehrt unterhalb des Mittelwertes. Ebenso wie bei Ozon haben die Temperaturdaten eine abgeflachte Verteilung. Ihre Wölbung ist mit Werten zwischen -1,56 (Forstthof) und -1,64 (Wiener Neustadt) deutlich negativ.

Tabelle 8: Statistische Parameter der Temperaturdaten der untersuchten Stationen

<i>Station</i>	<i>Mittelwert [<math>^{\circ}</math>C]</i>	<i>Standardabweichung</i>	<i>Schiefe</i>	<i>Wölbung</i>
Forsthof	15,0	2,47	0,210	-1,56
Gänserndorf	17,4	3,57	0,169	-1,62
Hainburg	17,8	3,20	0,098	-1,55
Illmitz	18,4	3,41	0,073	-1,62
Mistelbach	16,9	3,60	0,022	-1,63
Pillersdorf	17,2	2,80	0,059	-1,58
Schwechat	17,7	3,10	0,026	-1,60
Stockerau	17,3	3,62	0,073	-1,63
Wr. Neustadt	17,3	3,40	-0,067	-1,64

### Werktags-/Wochenendunterschiede

Analog zu den Ozontagesgängen wurden auch die mittleren Tagesgänge der Temperaturwerte von den Werktagen und Wochenenden verglichen und nach Ereigniswochen und normalen Wochen unterschieden (alle Abbildungen siehe Anhang).

Das Temperaturminimum ist bei allen Stationen zwischen 3 und 5 Uhr morgens, das Maximum zwischen 13 und 15 Uhr nachmittags. Zwischen den Werktagen und Wochenenden sowie zwischen den Ereigniswochen und normalen Wochen findet man kaum Veränderungen der Minima und Maxima. Der Verlauf der Temperaturkurven zeigt in allen Fällen eine leichte Neigung nach rechts. Diese Asymmetrie entsteht, da sich die Luft langsamer erwärmt, als sie später wieder abkühlt.

Alle Stationen, mit Ausnahme von Stockerau, weisen außerdem eine Abhängigkeit der Tagesamplitude vom Schwellenwert auf. In Ereigniswochen ist dieses Phänomen sehr deutlich zu erkennen, an manchen Stationen ist dies auch in normalen Wochen der Fall (Forsthof, Gänserndorf, Illmitz, Mistelbach und Pillersdorf). Dabei weisen die Tagesgänge der Werktage eine höhere Amplitude als die der Wochenenden auf. Bei einigen Stationen, z.B. Forsthof, kommt dies nur durch eine sehr starke Erwärmung am Nachmittag zustande. Bei anderen Stationen wie Schwechat oder Wiener Neustadt (Abbildung 49) kommt es sowohl zu einer starken Erwärmung am Nachmittag als auch zu einer starken Abkühlung in der Nacht.

Der erwartete Einbruch in den Morgenstunden durch das erhöhte  $\text{NO}_x$ -Angebot ist bei keiner Station erkennbar. An den Stationen Schwechat, Wiener Neustadt, Gänserndorf, Stockerau und Mistelbach sind die Temperaturwerte der Morgenstunden an Werktagen bei den höheren Schwellenwerten zwar deutlich tiefer als die der Wochenenden, dies dürfte aber andere Gründe haben, da die Abkühlung bereits während der Nachtstunden beginnt und bis zum Morgen stetig vorangeht.

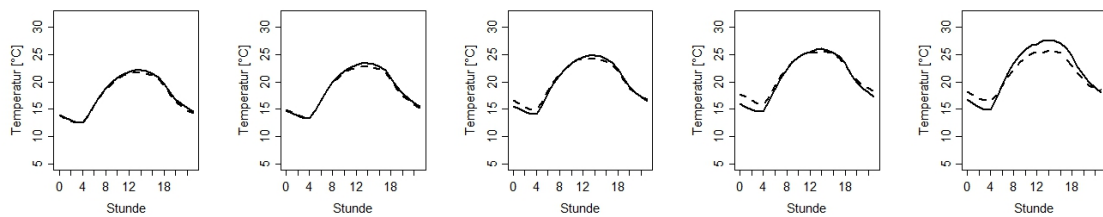


Abbildung 49: Die mittleren Temperaturtagesgänge der Station Wiener Neustadt an Ereigniswoche, unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie)

Auch für die Temperaturdaten wurde der maximale Unterschied von Werktagen zu Wochenenden berechnet, indem die Werktagswerte von den Wochenendwerten subtrahiert wurden (Tabelle 9). Um der Haupthypothese gerecht zu werden, sollten die maximalen Temperaturdifferenzen der Ereigniswochen analog zu den Ozonwerten höher als die der normalen Wochen sein. Dabei sind die Ergebnisse der untersuchten Stationen unterschiedlich. Die Annahme der höheren maximalen Temperaturdifferenzen in Ereigniswochen trifft nur teilweise zu. Bei den Stationen Gänserndorf, Hainburg, Mistelbach, Schwechat, Wiener Neustadt und vor allem Stockerau ist ein Zusammenhang mit dem Schwellenwert erkennbar. Je höher der Schwellenwert, desto eher sind die maximalen Temperaturdifferenzen der Ereigniswochen größer als die der normalen Wochen. Außerdem wird mit steigendem Schwellenwert die Differenz zwischen Ereigniswochen und normalen Wochen immer größer. Die Stationen Forsthof, Illmitz und Pillersdorf zeigen diese Trends allerdings nicht. An allen Stationen kommt es außerdem zu einem negativen Wert der maximalen Temperaturdifferenz. Das bedeutet, dass an den normalen Wochen die Temperaturwerte an Werktagen immer über den Temperaturwerten der Wochenenden liegen (vgl. Abbildung im Anhang).

Tabelle 9: Maximale Temperaturdifferenz ( $^{\circ}\text{C}$ ) der Werktags- und Wochenendwerte der untersuchten Stationen, nach Ereigniswochen (exc) und normalen Wochen (nex) unterschieden

	$80 \mu\text{gm}^{-3}$		$90 \mu\text{gm}^{-3}$		$100 \mu\text{gm}^{-3}$		$110 \mu\text{gm}^{-3}$		$120 \mu\text{gm}^{-3}$		$130 \mu\text{gm}^{-3}$		$140 \mu\text{gm}^{-3}$	
<i>Station</i>	<i>exc</i>	<i>nex</i>	<i>exc</i>	<i>nex</i>	<i>exc</i>	<i>nex</i>	<i>exc</i>	<i>nex</i>	<i>exc</i>	<i>nex</i>	<i>exc</i>	<i>nex</i>	<i>exc</i>	<i>nex</i>
Forsthof	0,01	-0,84	0,10	-0,61	-0,02	0,21	-0,03	0,44	-0,29	0,68	0,50	0,16	-1,05	0,20
Gänsersdorf	-0,09	-0,79	-0,61	0,60	-0,53	0,30	0,64	-0,19	1,07	-0,14				
Hainburg	-0,03	-0,10	0,06	-0,06	0,16	0,40	0,56	0,04	0,48	0,02	0,21	0,00		
Illmitz	-0,04	0,64	0,08	-0,71	-0,31	0,41	-0,17	0,38	-0,25	0,29				
Mistelbach	0,02	-0,41	-0,10	0,40	0,44	0,18	0,75	0,06	0,85	0,01	0,79	0,00		
Pillersdorf	-0,08	-0,62	-0,01	-0,13	0,09	0,04	0,01	0,22	-0,45	0,09	-1,53	0,00		
Schwechat	-0,10	0,33	0,08	0,11	0,51	-0,05	1,65	0,02	2,16	-0,10				
Stockerau	0,16	0,09	0,64	-0,24	1,21	-0,18	1,21	-0,09						
Wr. Neustadt	-0,01	0,69	0,24	0,45	1,04	-0,03	1,81	-0,15	1,78	-0,07				

Mit Hilfe des  $t$ -Tests wurden die Temperaturunterschiede von Werktagen zu Wochenenden auf ihre statistische Signifikanz überprüft. Da es auch hier kaum Normalverteilungen gibt, wurden alle Datensätze logarithmiert, bevor sie getestet wurden. Dabei gab es sowohl für die Ereigniswochen als auch für die normalen Wochen jeweils drei signifikante Ergebnisse auf dem 0,05-Niveau. Forsthof wies einen signifikanten Temperaturunterschied bei einem Schwellenwert von  $140 \mu\text{gm}^{-3}$  in Ereigniswochen sowie bei  $80$  und  $90 \mu\text{gm}^{-3}$  bei normalen Wochen auf. Der Unterschied der Station Illmitz war beim  $120\text{-}\mu\text{gm}^{-3}$ -Schwellenwert signifikant, Pillersdorf beim  $130\text{-}\mu\text{gm}^{-3}$ -Schwellenwert jeweils in Ereigniswochen. Pillersdorf wies außerdem beim  $80\text{-}\mu\text{gm}^{-3}$ -Schwellenwert in normalen Wochen eine Signifikanz auf (Abbildungen 50 bis 55).

Diese Signifikanz ist bei den statistisch signifikanten Stationen in Ereigniswochen vermutlich auf eine starke Temperaturerhöhung am Nachmittag an Werktagen zurückzuführen. Während normaler Wochen findet man dieses Phänomen ebenfalls in Pillersdorf (Abbildung 55). In Forsthof kommt es in normalen Wochen während der Nachtstunden zu einer starken Abkühlung an den Wochenenden, wodurch ein großer Temperaturunterschied in den Morgenstunden entsteht (Abbildungen 51 und 52). Dieser ist allerdings nicht Folge eines erhöhten  $\text{NO}_x$ -Angebotes und dem damit einhergehenden beschleunigten Ozonabbau, da die Abkühlung in der Nacht stetig vorangeht.

Auch bei den Temperaturdaten scheint der  $p$ -Wert des  $t$ -Tests abhängig vom Schwellenwert zu sein (Abbildung 56 und 57). Dabei drehen sich die Abhängigkeiten von Ereigniswochen und normalen Wochen allerdings um. Während sich bei den Ereigniswochen der  $p$ -Wert mit steigendem Schwellenwert dem Signifikanzniveau nähert, ebenso wie bei den Ozonwerten, findet man bei den normalen Wochen bei den niedrigen Schwellenwerten signifikante Werte. Mit steigendem Schwellenwert entfernt sich dieser  $p$ -Wert allerdings immer weiter.



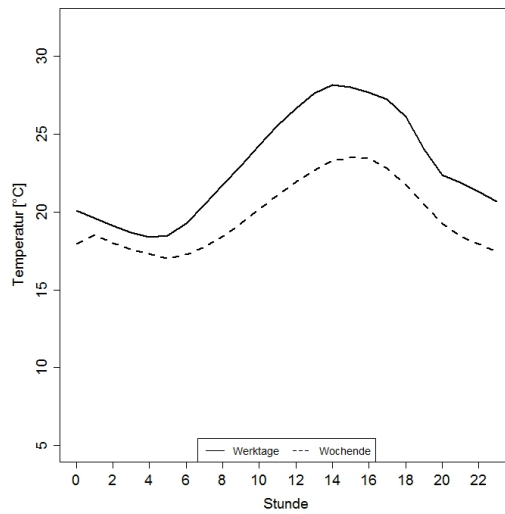


Abbildung 50: Der mittlere Temperaturtagesgang der signifikanten Station Forsthof in Ereigniswochen, bei einem Schwellenwert von  $140 \mu\text{gm}^{-3}$ , unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie)

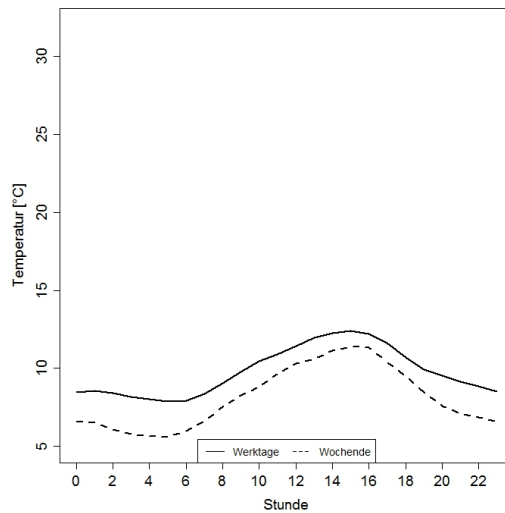


Abbildung 51: Der mittlere Temperaturtagesgang der signifikanten Station Forsthof in normalen Wochen, bei einem Schwellenwert von  $80 \mu\text{gm}^{-3}$ , unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie)

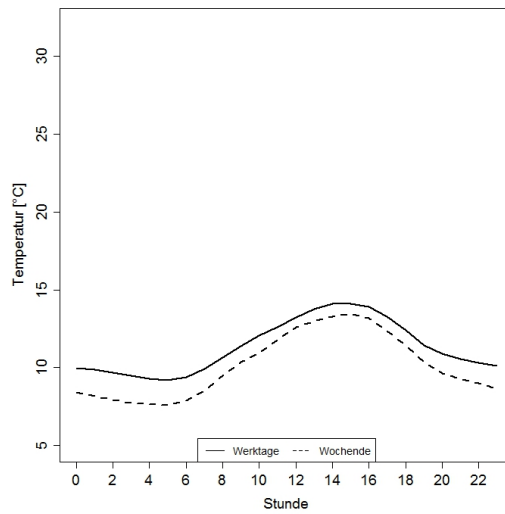


Abbildung 52: Der mittlere Temperaturtagesgang der signifikanten Station Forsthof in normalen Wochen, bei einem Schwellenwert von  $90 \mu\text{gm}^{-3}$ , unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie)

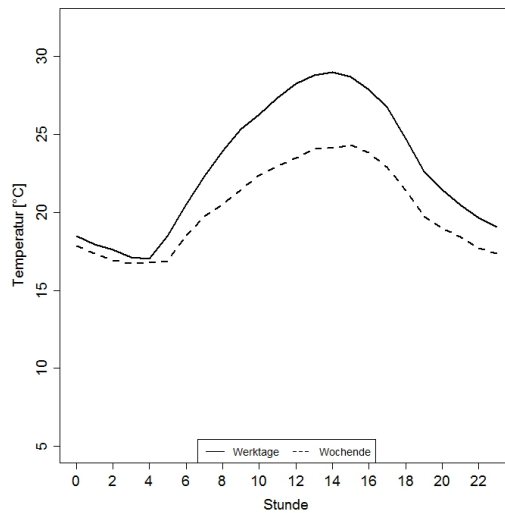


Abbildung 53: Der mittlere Temperaturtagesgang der signifikanten Station Illmitz in Ereigniswochen, bei einem Schwellenwert von  $120 \mu\text{gm}^{-3}$ , unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie)

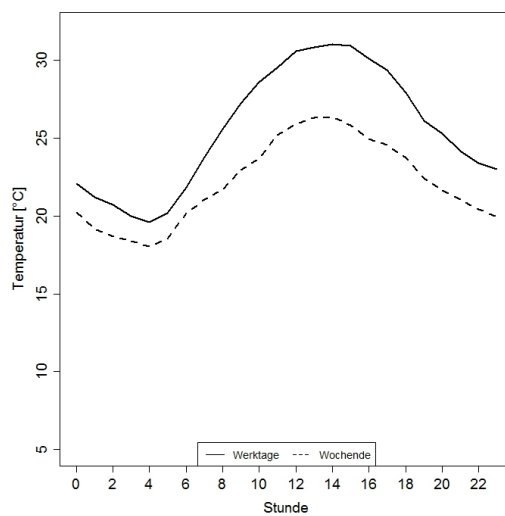


Abbildung 54: Der mittlere Temperaturtagesgang der signifikanten Station Pillersdorf in Ereigniswochen, bei einem Schwellenwert von  $130 \mu\text{gm}^{-3}$ , unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie)

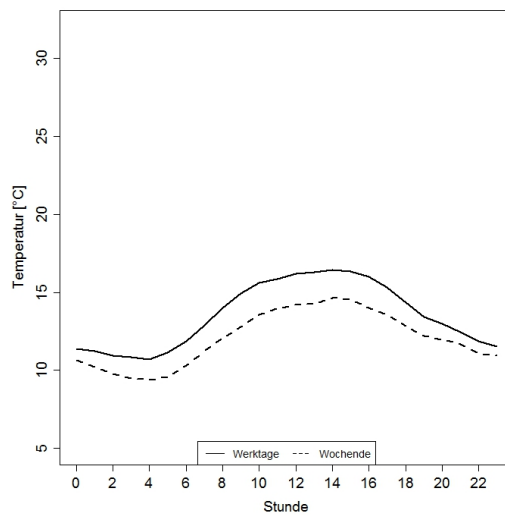


Abbildung 55: Der mittlere Temperaturtagesgang der signifikanten Station Pillersdorf in normalen Wochen, bei einem Schwellenwert von  $80 \mu\text{gm}^{-3}$ , unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie)

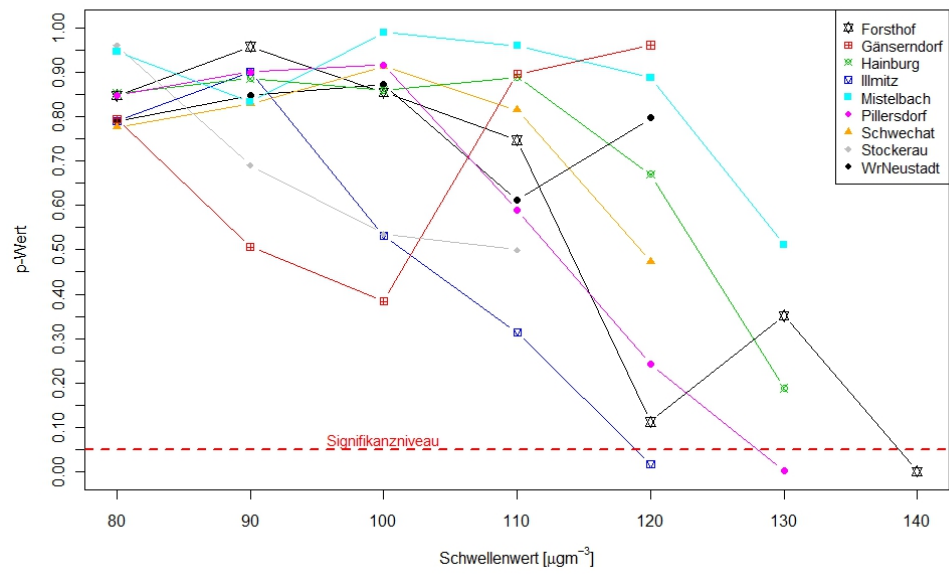


Abbildung 56: Die Veränderung des p-Wertes mit steigendem Schwellenwert bei Ereigniswochen der Temperatur [eigene Darstellung]

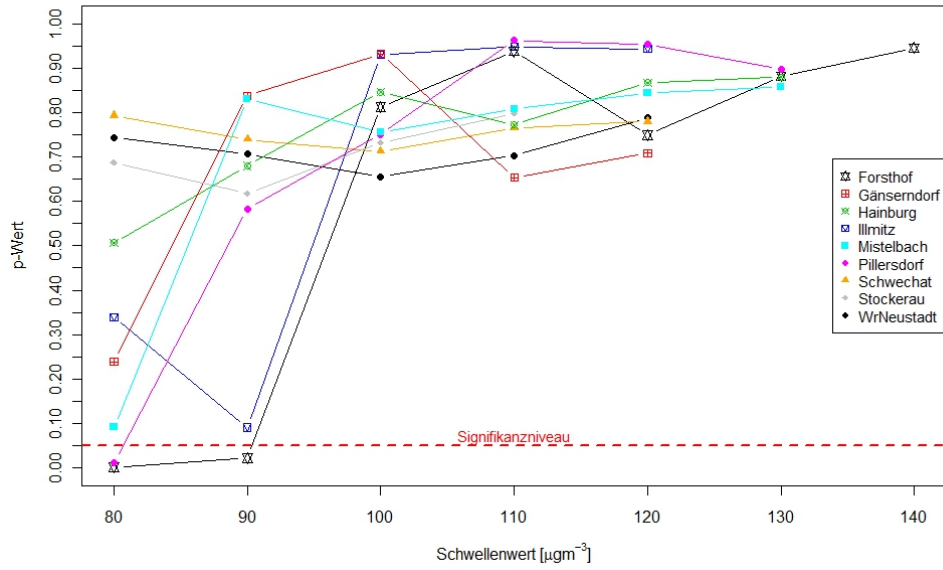


Abbildung 57: Die Veränderung des p-Wertes mit steigendem Schwellenwert bei normalen Wochen der Temperatur [eigene Darstellung]

Die signifikanten Unterschiede weisen bei allen Stationen deutlich höhere Temperaturwerte an Werktagen als an Wochenenden auf, anders als bei der Studie von Beaney und Gough 2002, die höhere Temperaturwerte an den Wochenenden bei allen signifikanten Stationen aufwies [4]. Dieses Ergebnis ist überraschend und sollte weiter untersucht werden.

### Amplitudenanalyse

Um der Notwendigkeit der Normalverteilung bei der Untersuchung aus dem Weg zu gehen wurde eine Analyse mit Hilfe der Tagestemperaturamplituden durchgeführt. Dafür wurden für alle 4 aufbereiteten Tagesgänge (exc-wd, nex-wd, exc-we, nex-we) das Temperaturminimum vom Temperaturmaximum subtrahiert:

$$\Delta T = T_{\max} - T_{\min} \quad (32)$$

Danach wurde die relative Amplitude, die Beziehung zwischen Ereigniswochen und normalen Wochen, für die Werktage und die Wochenenden getrennt berechnet. Die Formel für die Berechnung der relativen Amplitude lautet:

$$\Delta T_{\text{rel}} = \frac{\Delta T_{\text{exc}}}{\Delta T_{\text{nex}}} \quad (33)$$

Die Überlegung dabei war, dass während der Ereigniswochen an Werktagen das Temperaturminimum in den Morgenstunden tiefer liegt als in den normalen Wochen. Durch den rascheren Ozonabbau in den Morgenstunden, wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben, würde bei einem starken Zusammenhang zwischen Ozon und der Temperatur auch die Temperatur absinken. Das Maximum allerdings weist vermutlich einen kaum veränderten Wert auf, da in den Ereigniswochen an Werktagen durch das große Angebot an Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ) viel Ozon während des Tages gebildet werden kann und somit auch die Temperatur stark ansteigt. Dadurch sollte die Amplitude in Ereigniswochen größer sein als in normalen Wochen. Als Folge davon sollte der Quotient (Formel 32) größer als 1 sein (Formel 35). An den Wochenenden kommt es durch das geringere Verkehrsaufkommen nur geringfügig oder gar nicht zu diesen Prozessen. Daher können folgende Grundannahmen getroffen werden:

$$\Delta T_{\text{exc}} \geq \Delta T_{\text{nex}} \quad (34)$$

Daraus folgt:

$$\Delta T_{\text{rel[wd]}} > 1 \quad (35)$$

Somit gilt:

$$\Delta T_{\text{wd}} \geq \Delta T_{\text{we}} \quad (36)$$

Tabelle 10 zeigt die Ergebnisse dieser Analyse. Die Temperaturamplitudenwerte der Werktage sind meist höher als die der Wochenenden. Annahme 36 gilt also an den meisten Stationen. Nur Gänserndorf, Illmitz und Pillersdorf folgen bei einem Schwellenwert von  $80 \mu\text{gm}^{-3}$ , Illmitz außerdem noch bei  $90 \mu\text{gm}^{-3}$  dieser Annahme nicht. Hier sind die relativen Temperaturamplituden an den Wochenenden höher als an den Werktagen. Auch die Annahmen 34 bzw. 35 sind für die meisten Datensätze gültig. Während Ereigniswochen ist die relative Temperaturamplitude ebenfalls höher als in normalen Wochen. Nur an Wochenenden gibt es bei den Stationen Forsthof, Illmitz, Schwechat und Wiener Neustadt den entgegengesetzten Trend. Die relative Amplitude ist hier kleiner als 1, daher sind die Werte der normalen Wochen höher als die der Ereigniswochen. Allerdings trifft die Annahme 36 in diesen Fällen zu.

Tabelle 10: Relative Temperaturamplituden ( $^{\circ}\text{C}$ ) der untersuchten Stationen, nach Werktagen (wd) und Wochenenden (we) unterschieden

	$80 \mu\text{gm}^{-3}$		$90 \mu\text{gm}^{-3}$		$100 \mu\text{gm}^{-3}$		$110 \mu\text{gm}^{-3}$		$120 \mu\text{gm}^{-3}$		$130 \mu\text{gm}^{-3}$		$140 \mu\text{gm}^{-3}$	
<i>Station</i>	<i>wd</i>	<i>we</i>	<i>wd</i>	<i>we</i>	<i>wd</i>	<i>we</i>	<i>wd</i>	<i>we</i>	<i>wd</i>	<i>we</i>	<i>wd</i>	<i>we</i>	<i>wd</i>	<i>we</i>
Forsthof	1,54	1,24	1,50	1,24	1,21	1,16	1,17	1,03	1,18	0,90	1,24	1,02	1,44	0,90
Gänserndorf	1,28	1,34	1,28	1,12	1,27	1,07	1,29	1,17	1,42	1,14				
Hainburg	1,45	1,38	1,31	1,27	1,32	1,13	1,30	1,19	1,35	1,11	1,43	1,09		
Illmitz	1,18	1,69	1,24	1,47	1,21	1,11	1,23	0,93	1,29	0,78				
Mistelbach	1,44	1,18	1,30	1,13	1,29	1,08	1,33	1,13	1,38	1,15	1,39	1,07		
Pillersdorf	1,42	1,56	1,25	1,24	1,21	1,19	1,23	1,09	1,30	1,14	1,44	1,02		
Schwechat	1,28	1,11	1,20	1,09	1,19	1,07	1,30	1,02	1,22	0,98				
Stockerau	1,22	1,07	1,19	1,12	1,21	1,09	1,23	1,12						
Wr. Neustadt	1,21	0,99	1,23	1,03	1,21	1,02	1,26	1,06	1,38	1,01				

## Modellierung

Abschließend wurde eine Modellierung mit dem Strahlungsübertragungsmodell „libRadtran“ (library for radiative transfer) [37, 65] durchgeführt. Dabei wurde der maximale relative Unterschied (Schwechat in Ereigniswochen bei einem Schwellenwert von  $120 \mu\text{gm}^{-3}$ ) von den Werktags- zu den Wochenendozontagesgängen, von etwa 40% verwendet.

Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse dieser Modellierung. Die Ausgangssituation mit den Eingangsparametern zeigt eine Gesamtstrahlungsbilanz von  $622,56 \text{ Wm}^{-2}$ . Bei der Erhöhung der Ozonkonzentration im untersten Kilometer der Atmosphäre um 40% kommt es zu einer Zunahme dieser Strahlungsbilanz um  $0,03 \text{ Wm}^{-2}$ . Nach Schumann (2007) [46] entspricht das in etwa  $0,03 \text{ }^{\circ}\text{C}$  Erwärmung. Mit vermehrtem Einfluss der Ozonänderung in den höheren Atmosphärenschichten nimmt dieser Strahlungsantrieb zu, ist allerdings mit einem Wert von  $0,12 \text{ Wm}^{-2}$ , was nach [46] einer Temperaturerwärmung von  $0,13 \text{ }^{\circ}\text{C}$  entspricht, bei einer Erhöhung der Ozonkonzentration in den unteren vier Kilometer um 40% immer noch sehr niedrig.

Genaue Angaben über die Veränderung der Temperatur im konkreten Untersuchungsbeispiel können nicht gemacht werden, da keinerlei Informationen über das vertikale Profil an den Standorten vorhanden sind. Man kann lediglich erkennen, dass eine Ozonänderung in den unteren Kilometern der Atmosphäre geringe Auswirkungen auf den Strahlungsantrieb hat.

Tabelle 11: Ergebnisse der Berechnungen mit dem Strahlungsmodell „libRadtran“ [37, 65] in  $\text{Wm}^{-2}$

<i>Ozonänderungen</i>	<i>langwellige Strahlungsbilanz</i>	<i>kurzwellige Strahlungsbilanz</i>	<i>Gesamt- strahlungsbilanz</i>	<i>Strahlungsantrieb</i>
Eingangswerte	-73,27	695,83	622,56	
40%-Erhöhung im untersten Kilometer (km)	-73,21	695,80	622,59	0,03
40%-Erhöhung in den untersten 2 km	-73,11	695,75	622,64	0,08
40%-Erhöhung in den untersten 3 km	-73,03	695,70	622,67	0,11
40%-Erhöhung in den untersten 4 km	-72,97	695,65	622,68	0,12

## 5.4 Zusammenfassung und Diskussion

Bereits aus der allgemeinen Analyse der gesamten Daten konnten interessante Ergebnisse erzielt werden. In einem ersten Schritt wurde anhand des durchschnittlichen Ozonjahresganges die Untersuchungszeitspanne (Abbildung 26) festgelegt. Diese verläuft von April bis August. Im Vergleich zum Jahresgang der Temperatur wird ersichtlich, dass diese erst etwa ein Monat nach vermehrter Ozonbildung deutlich ansteigt.

Für die Analyse weniger relevant, dennoch interessant, zeigen die Jahresmittelwerte den „Hitzesommer 2003“ sehr deutlich. In diesem Jahr sind sowohl die Ozon- als auch die Temperaturwerte in den Sommermonaten enorm hoch. Im Jahr 2007 gab es ebenfalls einen so heißen Sommer, allerdings nicht auffallend hohe Ozonwerte. Die Ozondurchschnittswerte der einzelnen Wochentage weisen, vor allem im gesamten Jahresüberblick, deutlich den „Weekend-Effekt“ auf. Die  $\text{O}_3$ -Werte der Wochenenden sind, trotz veringertener Precursoren für die Ozonproduktion (vgl. Abschnitt 3.1.1), höher als an den Werktagen. In den Sommermonaten ist dieser Trend nur noch an vereinzelt Stationen bemerkbar, vor allem in Schwechat, Stockerau und Wiener Neustadt. Daher ist anzunehmen, dass diese durch anthropogene Emissionen besonders beeinflusst werden.

Der Überblick über die Temperaturwerte der einzelnen Wochentage zeigt ein anderes Bild. Die Wochenenden haben im Allgemeinen und auch in den Sommermonaten die geringsten Werte im Wochenverlauf. Der markanteste Anstieg erfolgt bei der Temperatur von Sonntag auf Montag. Vermutlich wird dieser durch die vermehrten Emissionen durch den Verkehr und die Industrie hervorgerufen. Bereits diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass Ozon nicht ausschlaggebend zur Erhöhung der Temperatur beiträgt, da die Trends der einzelnen Wochentage unterschiedlich verlaufen. Wie in Abschnitt 2.4.1 beschrieben, spielen viele Stoffe und lokale Gegebenheiten für die Temperaturbildung eine Rolle.



Wie bereits in Abschnitt 2.4.1 erläutert, weisen auch andere den Strahlungshaushalt beeinflussenden Parameter einen Wochenzyklus auf. In diesem Fall dürfte Ozon nur eine untergeordnete Wichtigkeit im Vergleich zu den anderen Parametern haben.

Auch die durchschnittlichen Tagesgänge der gesamten Daten weisen interessante Ergebnisse auf. In den frühen Morgenstunden gibt es sowohl im Gesamtüberblick als auch in den Sommermonaten nur vereinzelt einen verstärkten Ozonabbau – am deutlichsten bei den Stationen Schwechat, Stockerau und Wiener Neustadt. Die Temperaturtagesgänge weisen allerdings keinen raschen Temperaturabfall in den Morgenstunden auf, weder insgesamt noch in den Sommermonaten. Außerdem kann man an den Tagesgängen von April bis August, unterschieden nach Werktagen und Wochenenden, erkennen, dass der rasche Ozonabbau nur an den Werktagen vor sich geht - wiederum vor allem bei den Stationen Schwechat, Stockerau und Wiener Neustadt. An den Wochenenden ist dieser nicht zu verzeichnen. Außerdem verläuft der Temperaturtagesgang an Werktagen sehr ähnlich wie der der Wochenenden. Auch diese Erkenntnisse lassen bereits vermuten, dass Ozon keinen ausschlaggebenden Einfluss auf die Temperatur hat.

Bei der Analyse der Ozonmesswerte konnte festgestellt werden, dass die Station Forst-hof die höchsten, Stockerau die tiefsten Werte aufweist. Außerdem hat Forst-hof im Vergleich zu den anderen Stationen eine sehr geringe Streuung um den Mittelwert. Dies ist lokal bedingt.

Die einzelnen O<sub>3</sub>-Tagesgänge (Ereigniswochen und normale Wochen unterschieden nach Werktags- und Wochenendwerten) zeigen, dass es generell während Ereigniswochen an den Werktagen höhere Werte als an den Wochenenden gibt. In normalen Wochen weist dieser Zusammenhang in die umgekehrte Richtung. Der „Weekend-Effekt“ ist also nur in normalen Wochen zu verzeichnen. Außerdem weisen die Ozontagesgänge während Ereigniswochen eine höhere Amplitude und gleichzeitig größere Werktags-/Wochenendunterschiede auf. Besonders interessant ist der Verlauf mit variierendem Schwellenwert. Vor allem an Ereigniswochen ist ein deutlicher Anstieg der Unterschiede mit steigendem Schwellenwert erkennbar.

Bei den Ozontagesgängen kann man außerdem nur vereinzelt einen rascheren Abbau in den Morgenstunden finden. Wieder sind es die Stationen Schwechat, Stockerau und Wiener Neustadt, welche diesen Trend am deutlichsten zeigen.

Außerdem haben diese 3 Stationen die größten maximalen Unterschiede zwischen Werktags- und Wochenendwerten. Diese maximale Differenz in Schwechat, Stockerau und Wiener Neustadt ist zudem in Ereigniswochen größer als in normalen Wochen. Dieser Trend zeigt sich an allen Stationen mit steigendem Schwellenwert immer deutlicher. Also auch hier ist die Wahl des Schwellenwertes gut zu überdenken.

Beim Test auf statistische Signifikanz der Unterschiede zwischen Werktags- und Wochenendozonwerten, dem *t*-Test, ist die Wahl des Schwellenwertes ebenfalls ausschlaggebend. Wie die Abbildungen 47 und 48 deutlich zeigen, verändert sich der p-Wert in Ereigniswochen mit steigendem Schwellenwert in Richtung des 0,05-Signifikanzniveau. In normalen Wochen gibt es allerdings keinen sichtbaren Trend mit Schwellenwertänderungen. Statistische Signifikanz lässt sich außerdem nur während Ereigniswochen an den Stationen Schwechat, Forst-hof und Pillersdorf feststellen (Tabelle 12). Unter den signi-

fikanten Stationen ist Schwechat allerdings die einzige, welche der Grundannahme folgt und deren Signifikanz auf einen verstärkten Abbau in den Morgenstunden an Werktagen zurückzuführen ist.

Bei den Temperaturdaten weist die Station Illmitz die höchsten, Forsthof die niedrigsten Werte auf – im Gegensatz zu Ozon, wo es die höchsten Werte hat. Forsthof zeigt aber wieder die konstanteste Wertereihe von allen Stationen mit wenig Streuung um den Mittelwert.

Die Temperaturtagesgänge der einzelnen Stationen weisen ebenso wie die Ozontagesgänge eine Abhängigkeit vom Schwellenwert auf, besonders während Ereigniswochen. Außerdem kommt es vor allem in den Ereigniswochen zu einer höheren Temperaturamplitude an den Werktagen als an den Wochenenden. Die Stationen Schwechat und Wiener Neustadt weisen eine starke Erwärmung am Nachmittag und gleichzeitig eine rasche Abkühlung in der Nacht, also eine sehr große Amplitude, in Ereigniswochen auf. Den Temperaturabfall nachts mit steigendem Schwellenwert verzeichnen teilweise auch andere Stationen wie z.B. Stockerau, Mistelbach und Gänserndorf. Ansonsten zeigen die Temperaturtagesgänge keine besonderen Trends auf, auch nicht in den Morgenstunden. Der Zusammenhang zwischen Ozon und Temperatur ist beim Vergleich der Tagesgänge daher nicht zu erkennen.

Die Wahl des Schwellenwertes spielt auch bei der absoluten maximalen Differenz der Temperatur eine Rolle. Mit steigendem Schwellenwert wird der Unterschied von Ereignis- und normalen Wochen immer größer. Während die Temperaturdifferenz in Ereigniswochen zunimmt, verringert sich diese in normalen Wochen zunehmend (vgl. Tabelle 9). Außerdem ist erkennbar, dass der maximale Unterschied in normalen Wochen häufig negative Werte aufweist, das heißt, der stündliche Werktagswert liegt während des ganzen Tagesganges über dem stündlichen Wochenendwert. Dies ist ein Anzeiger dafür, dass der Zusammenhang zwischen Ozon und Temperatur nicht dominant ist, da die Temperaturdaten in diesem Fall (negative Werte) dem „Weekend-Effekt“ nicht folgen. Bei der maximalen Differenz der  $O_3$ -Daten gibt es im Gegensatz dazu nur sehr vereinzelt einen negativen Wert.

Die Analyse nach statistischer Signifikanz der Werktags- und Wochenendtemperaturunterschiede mit dem  $t$ -Test zeigte sowohl an Ereignis- als auch in normalen Wochen positive Ergebnisse. Die Unterschiede waren bei Forsthof, Illmitz und Pillersdorf mit bestimmten Schwellenwerten signifikant (Tabelle 12). Keine dieser Stationen hatte aber auf Grund von beschleunigtem Temperaturabfall in den Morgenstunden diese signifikanten Werte. Die Haupthypothese, dass die Temperatur der Troposphäre durch das bodennahe Ozon entscheidend beeinflusst wird, kann in diesem Fall also verworfen werden. Außerdem haben alle signifikanten Stationen während des gesamten Tages zur selben Uhrzeit höhere Temperaturwerte an Werktagen als an Wochenenden. Dies stellt einen Widerspruch zu den Annahmen und Ergebnissen von Beaney und Gough 2002 dar [4]. Die  $p$ -Werte weisen bei der Temperatur sowohl während Ereignis- als auch normalen Wochen einen Zusammenhang mit dem Schwellenwert auf. Während mit steigendem Schwellenwert die Werte der Ereigniswochen in Richtung Signifikanzniveau gehen – ebenso wie bei Ozon – kommt es bei den normalen Wochen zum umgekehrten Trend.

Da ein Zusammenhang zwischen den Ozontagesgängen und den Temperaturtagesgängen an keiner Station nachweisbar ist, ist ein Einfluss einer Ozonänderung auf die Temperatur nicht entscheidend. Auch die Modellrechnungen zeigen, dass eine deutliche Ozonerhöhung kaum Auswirkungen auf die Temperatur hat. Die Haupthypothese, dass Ozon einen entscheidenden Einfluss auf die Temperatur hat, kann verworfen und die  $H_0$  angenommen werden.

Die zusätzliche Analyse der Temperaturdaten, die Amplitudenanalyse, zeigt, dass Annahme 36 bei den meisten Stationen zutreffend ist (Tabelle 12): Die Temperaturamplitude an den Werktagen ist meist höher als an den Wochenenden. Dieser Trend ist besonders mit Zunahme des Schwellenwertes erkennbar. Außerdem treffen die Annahmen 34 und 35 ebenfalls in den meisten Fällen zu (Tabelle 12). Somit sind die Temperaturamplituden der Ereigniswochen ebenfalls höher als die der normalen Wochen. Das Zutreffen dieser Annahmen deutet vor allem auf anthropogenen Einfluss hin. Durch temperaturbeeinflussende Emissionen kommt es während der Wochentage zu einer höheren Amplitude als an den Wochenenden. Da auch während Ozonereigniswochen die Temperaturamplitude höher ist, könnte eventuell ein Zusammenhang bestehen. Allerdings ist bei dieser Analyse ungewiss, ob nicht eine andere Substanz (vgl. Abschnitt 2.4.1), die sich ähnlich wie Ozon verhält, die dominante treibende Kraft für die Temperatur ist.

Um nochmals auf die Ausgangssituation zurückzukommen, sollen hier die Haupthypothese sowie die weiteren Fragestellungen besprochen werden.

1. *Die Temperatur der Troposphäre wird durch das bodennahe Ozon entscheidend beeinflusst.*

Es gibt Anzeichen dafür, dass die Luftverschmutzung Einfluss auf die Temperatur hat. Allerdings kann man nicht sagen, dass Ozon hierbei die tragende Rolle spielt. Die durchgeführten Analysen sowie die Modellrechnung deuten darauf hin, dass eine oder mehrere andere Substanzen in der Luft wichtiger als Ozon sind. Besonders an den Stationen, an denen man an den Ozontagesgängen einen abnehmenden Trend in den Morgenstunden erkennen kann, findet man diesen bei den Temperaturdaten nicht. Diese sind vor allem die Tagesgänge von Schwechat, Stockerau und Wiener Neustadt.

Allerdings zeigt die Temperaturamplitudenanalyse, dass es einen Einfluss einer Strahlungsantriebseinflussgröße gibt. Aber es dürfte sich dabei nicht um bodennahes Ozon handeln. Die Haupthypothese kann daher verworfen und die  $H_0$  angenommen werden.

2. *Ist ein Ozon-Weekend-Effekt ersichtlich?*

Bereits die allgemeine Ergebnisanalyse zeigt, dass es im 10-Jahresdurchschnitt an jeder Station einen Weekend-Effekt zu verzeichnen gibt. Während der Sommermonate ist dieser Trend nur noch an bestimmten Stationen zu verzeichnen. Schwechat,

Tabelle 12: Statistische Ergebnisse von Ozon (O<sub>3</sub>) und Temperatur (T), unterschieden nach unterschiedlichen Schwellenwerten (SW [ $\mu\text{gm}^{-3}$ ]) sowie Ereigniswochen (exc) und normale Wochen (nex) bzw. Werktagen (wd) und Wochenenden (we)

		SW	Forstho	Gänsern- dorf	Hainburg	Ilmitz	Mistelbach	Pillersdorf	Schwechat	Stockerau	Wr. Neu- stadt
O <sub>3</sub> - Werk- tags-/ Wochen- end- unter- schiede	p-Wert (exc)	80	0,76	0,94	0,96	0,89	0,92	0,80	0,47	0,79	0,67
		90	0,73	0,92	0,94	0,89	0,80	0,82	0,47	0,50	0,64
		100	0,66	0,95	0,91	0,83	0,73	0,64	0,41	0,37	0,70
		110	0,72	0,58	0,93	0,46	0,88	0,31	0,17	0,18	0,57
		120	<b>0,01</b>	0,84	0,53	0,36	0,66	0,07	<b>0,01</b>		0,90
		130	0,16		0,20		0,49	<b>0,0003</b>			
		140	<b>0,0001</b>								
	p-Wert (nex)	80	0,70	0,98	0,91	0,92	0,93	0,49	0,57	0,70	0,87
		90	0,47	0,71	0,97	0,92	0,81	0,84	0,50	0,90	0,86
		100	0,63	0,95	0,79	0,95	0,92	0,78	0,49	0,83	0,73
		110	0,97	0,99	0,90	0,98	0,94	0,80	0,53	0,79	0,74
		120	0,45	0,94	0,89	0,94	0,95	0,95	0,50		0,69
		130	0,95		0,91		0,95	0,93			
		140	1,00								
T- Werk- tags-/ Wochen- end- unter- schiede	p-Wert (exc)	80	0,85	0,80	0,85	0,79	0,95	0,85	0,78	0,96	0,79
		90	0,96	0,51	0,89	0,90	0,83	0,90	0,83	0,69	0,85
		100	0,85	0,38	0,86	0,53	0,99	0,92	0,91	0,54	0,87
		110	0,75	0,90	0,89	0,31	0,96	0,59	0,81	0,50	0,61
		120	0,11	0,96	0,67	<b>0,02</b>	0,89	0,24	0,47		0,80
		130	0,35		0,19		0,51	<b>0,001</b>			
		140	<b>0,0004</b>								
	p-Wert (nex)	80	<b>0,001</b>	0,24	0,51	0,34	0,09	<b>0,01</b>	0,79	0,69	0,74
		90	<b>0,02</b>	0,84	0,68	0,09	0,83	0,58	0,74	0,62	0,71
		100	0,81	0,93	0,85	0,93	0,76	0,75	0,71	0,73	0,66
		110	0,94	0,65	0,77	0,95	0,81	0,96	0,76	0,80	0,70
		120	0,75	0,71	0,87	0,94	0,84	0,95	0,78		0,79
		130	0,88		0,88		0,86	0,90			
		140	0,95								
Ampli- tuden- analyse	$\Delta T_{\text{exc}} \geq \Delta T_{\text{nex}}$ (37)	bei allen SW außer 120 und 140 $\mu\text{gm}^{-3}$ (jeweils we)	bei al- len SW	bei al- len SW	bei al- len SW außer 110 und 120 $\mu\text{gm}^{-3}$ (jeweils we)	bei al- len SW	bei al- len SW	bei al- len SW	bei al- len SW außer 120 $\mu\text{gm}^{-3}$ (we)	bei al- len SW	bei al- len SW außer 80 $\mu\text{gm}^{-3}$ (we)
	$\Delta T_{\text{rel}[\text{wd}]} > 1$ (38)		bei allen SW								
	$\Delta T_{\text{wd}} \geq \Delta T_{\text{we}}$ (39)	bei al- len SW	bei al- len SW außer 80 $\mu\text{gm}^{-3}$	bei al- len SW	bei al- len SW außer 80 und 90 $\mu\text{gm}^{-3}$	bei al- len SW	bei al- len SW	bei al- len SW außer 80 $\mu\text{gm}^{-3}$	bei al- len SW	bei al- len SW	bei al- len SW

Stockerau und Wiener Neustadt haben auch von April bis August deutlich höhere Ozonwerte an den Wochenenden als an den Werktagen (Abbildungen 32 und 33). An diesen drei Stationen kommt es während Ereigniswochen vor allem in der Nacht zu höheren Wochenendwerten. Am Nachmittag, etwa zwischen 12 und 18 Uhr, sind die Werktagswerte höher. Während normaler Wochen findet man in der Nacht, zirka von 0 bis 5 Uhr, höhere Werktagswerte. Während der Tagesstunden sind die Wochenendwerte höher.

Der Weekend-Effekt ist deutlich ersichtlich, daher kann die  $H_0$  verworfen werden.

3. *Ist der Standort für die Ausprägung der Zusammenhänge ausschlaggebend?*

Es wurde angenommen, dass besonders an Standorten mit Nähe zu stark befahrenen Straßen, vor allem Autobahnen und Schnellstraßen, der Zusammenhang zwischen Ozon und Temperatur deutlich nachzuvollziehen sei. Dies war allerdings nicht der Fall. Während man bei den Ozondaten den Einfluss des Straßenverkehrs an den belasteten Stationen Schwechat, Stockerau und Wiener Neustadt gut erkannte, gab es bei den Temperaturdaten keinen auffallenden Trend. Schwechat, Stockerau und Wiener Neustadt wiesen bei den Ozontagesgängen einen morgendlichen Abbau auf, die Temperatur verzeichnete keinen Rückgang in den Morgenstunden.

Natürlich kommt es durch die unterschiedlichen Expositionen der Stationen, sowohl bei Ozon als auch bei der Temperatur, zu unterschiedlich hohen Werten. Diese Tatsache ist allerdings nicht ausschlaggebend für den Zusammenhang von Ozon und Temperatur.

Da ein anthropogener Einfluss aber deutlich erkennbar ist, scheint der Standort einen wichtigen Einfluss auf die Ausprägungen der mittleren Tagesgänge zu haben. Die 0-Hypothese wird wiederum verworfen.

4. *Unterscheiden sich die wochentags und an Wochenenden gemessenen Ozonkonzentrationen in Wochen mit erhöhten Ozonniveaus signifikant voneinander?*

Diese Annahme traf nur sehr selten zu, so in Forsthof bei zwei Schwellenwerten, in Schwechat und Pillersdorf bei einem Schwellenwert. Die Signifikanz war aber in Forsthof und Pillersdorf nicht wie angenommen durch einen beschleunigten Ozonabbau in den Morgenstunden zu verzeichnen, sondern auf Grund der hohen Unterschiede am Nachmittag. Nur Schwechat konnte bei einem Schwellenwert von  $120 \mu\text{gm}^{-3}$  diese Annahme bestätigen. Besonders auffällig war die Abhängigkeit der Signifikanz vom Schwellenwert (Abbildung 47).

Bei den eben genannten signifikanten Stationen Forsthof, Schwechat und Pillersdorf kann die  $H_0$  bei den zutreffenden Schwellenwerten verworfen werden. In allen anderen Fällen wird diese angenommen.

5. *Zeigen Werktage in Wochen mit erhöhtem Ozon signifikant andere Temperaturen im Tagesverlauf als an Wochenenden?*

Auch die Temperaturdaten weisen kaum signifikante Unterschiede auf. Lediglich Forsthof, Illmitz und Pillersdorf haben p-Werte unter dem 0,05-Signifikanzniveau, bei jeweils einem Schwellenwert. Auch hier gibt es einen starken Zusammenhang mit der Wahl des Schwellenwertes (Abbildung 56). Außerdem kommt es auch während normaler Wochen in Forsthof bei zwei Schwellenwerten sowie in Pillersdorf bei einem Schwellenwert zu signifikanten Unterschieden der Werktags- und Wochenendwerte.

Diese Signifikanzen folgen allerdings nie der Annahme, dass es durch das vermehrte  $\text{NO}_x$ -Angebot an Werktagen und dem damit einhergehenden beschleunigten Ozonabbau zu einer Temperaturabnahme in den Morgenstunden kommt.

Auch hier kann die 0-Hypothese nur in den signifikanten Fällen an den Stationen Forsthof, Illmitz und Pillersdorf verworfen werden. Die übrigen Unterschiede zwischen den Temperaturwerten der Werktage und der Wochenenden weisen keine Signifikanzen auf und müssen daher die  $H_0$  annehmen.

6. *Verhalten sich die Tagesgänge und Signifikanzen von Ozon und Temperatur ähnlich?*

Für die signifikanten Ozonreihen Forsthof bei einem Schwellenwert von  $140 \mu\text{gm}^{-3}$  und Pillersdorf bei einem Schwellenwert von  $130 \mu\text{gm}^{-3}$  bei Ereigniswochen gibt es sehr ähnliche Temperaturdatenreihen, welche ebenfalls Signifikanz auf dem 0,05-Niveau aufweisen. Die Tagesgänge von Forsthof und Schwechat bei einem Schwellenwert von  $120 \mu\text{gm}^{-3}$ , auch während Ereigniswochen, ähneln ebenfalls ihrem Temperaturpendant. In Schwechat sind die Ozonunterschiede von Werktags- und Wochenendwerten aber wesentlich stärker ausgeprägt.

Die signifikanten Temperaturtagesgänge während normaler Wochen, Forsthof bei 80 und  $90 \mu\text{gm}^{-3}$  Schwellenwert und Pillersdorf bei einem Schwellenwert von  $80 \mu\text{gm}^{-3}$ , weisen keine Übereinstimmung mit den dazu gehörenden Ozontagesgängen auf. Lediglich die bereits angesprochenen Stationen Forsthof bei  $140 \mu\text{gm}^{-3}$  Schwellenwert, Pillersdorf bei  $130 \mu\text{gm}^{-3}$  Schwellenwert und zusätzlich die Station Illmitz bei einem Schwellenwert von  $120 \mu\text{gm}^{-3}$  ähneln den passenden Ozondatenreihen.

Während man in normalen Wochen keine Übereinstimmung feststellen kann, ähneln sich die Tagesgänge der Ereigniswochen. Dies würde auf einen Zusammenhang zwischen Ozon und der Temperatur hindeuten. In diesen Fällen kann außerdem die  $H_0$  verworfen werden. In den restlichen wird sie angenommen.

7. *Ist die Ausprägung der Unterschiede abhängig vom verwendeten Schwellenwert?*

Diese Aussage kann klar bestätigt und die  $H_0$  verworfen werden. Besonders während Ereigniswochen ist immer ein Trend mit verändertem Schwellenwert erkenn-

bar. Alle durchgeführten Analysen, die maximale Differenz von Werktags- und Wochenendunterschieden während eines Tagesganges, die Signifikanz dieser Unterschiede und auch die Amplitudenanalysen, folgen während Ereigniswochen immer einem Trend. Aber auch während normaler Wochen kann es zu einem Zusammenhang mit der Wahl des Schwellenwertes kommen, wie zum Beispiel bei der Signifikanz der Temperaturunterschiede.

In der Studie von Beaney und Gough (2002) erfolgte die Wahl des Schwellenwertes willkürlich [4]. Dieser Punkt der kanadischen Studie ist wohl ihr größter Schwachpunkt. Die hier durchgeführte Studie zeigt deutlich, dass die Wahl des Schwellenwertes große Auswirkungen auf die Ergebnisse haben kann. Besonders während Ereigniswochen ist der Zusammenhang zwischen Schwellenwert und Ergebnis deutlich. Mit einem anderen Schwellenwert hätten die Kanadier vielleicht andere Ergebnisse erzielt.

#### 8. *Eignet sich die verwendete Methode für die Untersuchung der Haupthypothese?*

Die Ergebnisse zeigen, dass ein möglicher Zusammenhang offenbar vom Schwellenwert abhängt. Außerdem scheinen sich die lokalen Gegebenheiten in unterschiedlich hohen Schwellenwerten auszudrücken.

Die Einteilung in Ereigniswochen und normale Wochen ist jedoch eine gute Methode, um das Signal eines anthropogenen Einflusses und somit einen Zusammenhang besser herausfiltern und auch den Unterschied zu normalen Wochen darstellen zu können. Allerdings ist hier die Wahl des passenden Schwellenwertes Grundvoraussetzung.

Die Durchführung eines  $t$ -Tests bei einer nicht normalverteilten Datenmenge ist kritisch zu sehen. Die im Nachhinein durchgeführte Amplitudenanalyse sollte dieses Problem umgehen.

Allerdings gibt es hier ebenfalls wie bei den anderen Analysen das Problem, dass man andere Strahlungsantriebsparameter, welche ähnlich wie Ozon reagieren, nicht berücksichtigt. Während Ereigniswochen sind bestimmt auch andere Schadstoffe in der Luft, welche ähnliche Eigenschaften aufweisen. Die Zusammenhänge zwischen Temperaturänderungen in Ereigniswochen können nicht speziell auf Ozon zurückgeführt werden. Die allgemeine Analyse der Daten würde eher auf keinen Zusammenhang von  $O_3$  mit der Temperatur hindeuten. Allerdings findet man während der Analyse doch wieder Hinweise auf eine Wechselwirkung zwischen der Luft und ihrer Temperatur während Ereigniswochen. Andere Substanzen sollten hier nicht außer Acht gelassen werden. Würde man diese Methode auf weitere Strahlungsantriebsgrößen (vgl. Abschnitt 2.4.1) anwenden und danach vergleichen, wäre sie aussagekräftiger.

Zusammenfassend kann man sagen: Stellt sich die Frage nach dem anthropogenen Einfluss ist diese Methode gut einsetzbar und die  $H_0$  kann verworfen werden. Ist man allerdings versucht durch diese Methode einen bestimmten Strahlungsantriebs-

parameter für Temperaturveränderungen verantwortlich zu machen ist sie nicht verwendbar, da die Unterscheidung der verschiedenen Strahlungsantriebsparameter nicht möglich ist. Die  $H_0$  muss in diesem Fall angenommen werden.

Die Analyse zeigt also, dass vermutlich eine andere anthropogene Emission einen entscheidenden Einfluss auf die Temperatur ausübt, nicht aber Ozon. Besonders interessant ist hierbei die Frage des Schwellenwertes, der in allen Teilbereichen eine Rolle spielt. Dieser sollte gut überlegt und begründet werden.

In weiterer Folge sollte diese Analyse auch mit anderen Parametern des Strahlungsantriebes durchgeführt werden, um mehr über die Wechselwirkungen mit der Temperatur zu erfahren. Auch mit den Daten von Beaney und Gough (2002) sollten weitere Analysen durchgeführt werden. Die Frage nach anderen Parametern und der Wahl des Schwellenwertes sollte analysiert werden, um ihre Aussage zu verifizieren bzw. falsifizieren.



## Literatur

- [1] Andrews J.E., P. Brimblecombe, T.D. Jickells, P.S. Liss and B.J. Reid 2004: An Introduction to Environmental Chemistry. Blackwell Science. USA, UK, Australia
- [2] Atkinson-Palombo C.M., J.A. Miller and R.C. Balling Jr. 2006: Quantifying the ozone “weekend effect“ at various locations in Phoenix, Arizona. *Atmospheric Environment* 40 (2006), 7644–7658. Tempe
- [3] Badarinath K.V.S. and K. Madhavi Latha 2006: Direct radiative forcing from black carbon aerosols over urban environment. *Advances in Space Research*, Vol. 37 (2006) 2183–2188. Indien
- [4] Beaney G. and W.A. Gough 2002: The influence of tropospheric ozone on the air temperature of the city of Toronto, Ontario, Canada. *Atmospheric Environment*, Volume 2002, Issue 36, 2319–2325. Toronto
- [5] Beirle S., U. Platt, M. Wenig and T. Wagner 2003: Weekly cycle of NO<sub>2</sub> by GOME measurements: a signature of anthropogenic sources. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 3 (2003), 2225–2232. Heidelberg
- [6] Bergmann L. und C. Schäfer 2001: *Lehrbuch der Experimentalphysik: Band 7: Erde und Planeten*. Walter de Gruyter Verlag. Berlin, New York
- [7] Brimblecombe P. 1996: *Air Composition & Chemistry*. Cambridge University Press. Cambridge
- [8] Brönnimann S. 2002: *Ozon in der Atmosphäre*. Haupt. Bern, Stuttgart
- [9] Brönnimann S. and U. Neu 1997: Weekend-weekday differences of near-surface ozone concentrations in Switzerland for different meteorological conditions. *Atmospheric Environment*, Volume 31, Issue 8, 1127–1135. Bern
- [10] Bruntz S.M., W.S. Cleveland, T.E. Graedel, B. Kleiner and J.L. Warner 1974: Ozone Concentrations in New Jersey and New York: Statistical Association with Related Variables. *Science*, Volume 186, Issue October, 257–258. New Jersey
- [11] Bryant E. 1997: *Climate Process and Change*. Cambridge University Press. Cambridge
- [12] Cerverny R.S. and K.J. Coakley 2002: A weekly cycle in atmospheric carbon dioxide. *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, No. 2, 1028. Boulder, USA
- [13] Cerverny R.S. and R.C. Balling jr. 1998: Weekly cycles of air pollutants, precipitation and tropical cyclones in the coastal NW Atlantic region. *Nature*, Vol. 364, No. 6, 561–563. Tempe, USA
- [14] Chung Y.S. 1977: Ground-Level Ozone and Regional Transport of Air Pollutants. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 16, No. 11, 1127–1136. Toronto

- [15] Crutzen P.J., M.G. Lawrence and U. Pöschl 1999: On the background photochemistry of tropospheric ozone. *Tellus* (1999), 51 A-B, 123–146. Mainz
- [16] Crutzen P.J. and P.H. Zimmermann 1991: The changing photochemistry of the troposphere. *Tellus* (1991), 43 AB, 136–151. Mainz
- [17] Diem J.E. 2000: Comparison of weekday-weekend ozone: importance of biogenic volatile organic compound emissions in the semi-arid southwest USA. *Atmospheric Environment*, 34(2000), 3445–3451. USA
- [18] Fabian P. 1992: *Atmosphäre und Umwelt: chemische Prozesse, menschliche Eingriffe; Ozon-Schicht, Luftverschmutzung, Smog, saurer Regen*. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg
- [19] Fabian P. 2002: *Leben im Treibhaus: Unser Klimasystem – und was wir daraus machen*. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg
- [20] Forstser P.M., C.E. Johnson, K.S. Law, J.A. Pyle and K.P. Shine 1996: Further estimates of radiative forcing due to tropospheric ozone changes. *Geophysical Research Letters*, Vol. 23, No. 23, 3321–3324. U.K.
- [21] Forster P.M. and S. Solomon 2003: Observations of a “weekend-effect“ in diurnal temperature range. *Nature*, Vol. 100, No. 20, 11225–11230. UK
- [22] Forster P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Bernsten, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz and R. Van Dorland 2007: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge, New York
- [23] Galli C., M. Nardino, V. Levizzani, R. Rizzi and T. Georgiadis 2004: Radiative energy partition and cloud radiative forcing at a Po valley site. *Atmospheric Research*, Vol. 72 (2004), 329–351. Bologna
- [24] Gao H.O., B.A. Holmén and D.A. Niemeier 2005: Nonparametric factorial analysis of daily weigh-in-motion traffic: implications for the ozone “weekend effect“ in Southern California. *Atmospheric Environment*, 39 (2005), 1669–1682. Davis, Storrs
- [25] Gao H.O. 2007: Day of week effects on diurnal ozone/NO<sub>x</sub> cycles and transportation emissions in Southern California. *Transportation Research, Part D*, 12 (2007), 292–305. Ithaca
- [26] Graedel T.E. und P.J. Crutzen 1994: *Chemie der Atmosphäre: Bedeutung für Klima und Umwelt*. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg, Berlin, Oxford

- [27] Graedel T.E. und P.J. Crutzen 1996: Atmosphäre im Wandel: Die empfindliche Luft-hülle unseres Planeten. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg, Berlin, Oxford
- [28] Häckel H. 1999: Meteorologie. Ulmer Verlag. Stuttgart
- [29] Haywood J.M., M.D. Schwarzkopf and V. Ramaswamy 1998: Estimates of radiative forcing due to modeled increases in tropospheric ozone. Journal of Geophysical Research, Vol. 103, No. D14, 16999–17007. New Jersey
- [30] Jacob D.J. 1999: Introduction to atmospheric chemistry. Princeton University Press. New Jersey
- [31] Jenkin M.E., T.J. Davies and J.R. Stedman 2002: The origin and day-of-week dependence of photochemical ozone episodes in the UK. Atmospheric Environment, 36 (2002), 999–1012. Ascot, Abingdon
- [32] Kim B.G, M.H. Choi and C.H. Ho 2009: Weekly periodicities of meteorological variables and their possible association with aerosols in Korea. Atmospheric Environment, Vol. 43 (2009), 6058–6065. Korea
- [33] Koss V. 1997: Umweltchemie: Eine Einführung für Studium und Praxis. Springer Verlag. Heidelberg
- [34] Kraus H. 2000: Die Atmosphäre der Erde. Eine Einführung in die Meteorologie. Vieweg Verlag. Braunschweig, Wiesbaden.
- [35] Madhavi Latha K. and K.V.S. Badarinath 2005: Shortwave radiative forcing efficiency of urban aerosols - a case study using ground based measurements. Chemosphere, Vol. 58 (2005), 217–220. Indien
- [36] Marr L.C. and R.A. Harley 2002: Spectral analysis of weekday-weekend differences in ambient ozone, nitrogen oxide, and non-methane hydrocarbon time series in California. Atmospheric Environment, 36 (2002), 2327–2335. Berkeley
- [37] Mayer B. and A. Kylling 2005: Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations - description and examples of use. Atmospheric Chemistry and Physics 5, 1855–1877. Germany, Norway
- [38] Pont V. and J. Fontan 2001: Comparison between weekday and weekend ozone concentration in large cities in France. Atmospheric Environment, 35 (2001), 1527–1535. Toulouse, Frankreich
- [39] Qin Y., G.S. Tonnesen and Z. Wang 2004: Weekend/weekday differences of ozone,  $\text{NO}_x$ , CO, VOCs,  $\text{PM}_{10}$  and the light scatter during ozon season in southern California. Atmospheric Environment, 38 (2004), 3069–3087. USA
- [40] Ramanathan V. and G. Carmichael 2008: Global and regional climate changes due to black carbon. Nature Geoscience, Vol. 1, April 2008, 221–227. Iowa, USA

- [41] Ramanathan V. and Y. Feng 2009: Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives. *Atmospheric Environment* 43 (2009), 37–50. San Diego
- [42] Sadanaga Y., S. Shibata, M. Hamana, N. Takenaka and H. Bandow 2008: Week-day/weekend difference of ozone and its precursors in urban areas of Japan, focusing on nitrogen oxides and hydrocarbons. *Atmospheric Environment*, 42 (2008), 4708–4723. Japan
- [43] Satheesh S.K. and K. Krishna Moorthy 2005: Radiative effects of natural aerosols: a Review. *Atmospheric Environment*, Vol. 39 (2005), 2089–2110. Indien
- [44] Schmetz J. und E. Raschke 1986: Bewölkung und Strahlungshaushalt der Erde. In: *Atmosphäre, Klima, Umwelt*. 1990. Spektrum der Wissenschaft-Verlagsgesellschaft. Heidelberg
- [45] Schönwiese Ch.D. 2003: *Klimatologie*. Eugen Ulmer Verlag. Stuttgart
- [46] Schumann U. 2007: Klimawirkungen des Luftverkehrs. Informationen zum Fachgespräch „Luftverkehr und Klimaschutz“, Deutscher Bundestag. Berlin
- [47] Simmonds I. and K. Keay 1997: Weekly cycle of meteorological variations in Melbourne and the role of pollution and anthropogenic heat release. *Atmospheric Environment*, Vol. 31, No. 11, 1589–1603. Melbourne
- [48] Stevenson D.S., C.E. Johnson, W.J. Collins, R.G. Derwent, K.P. Shine and J.M. Edwards 1998: Evolution of tropospheric ozone radiative forcing. *Geophysical Research Letters*, Vol. 25, No. 20, 3819–3822. U.K.
- [49] Stjern C.W. 2011: Weekly cycles in precipitation and other meteorological variables in a polluted region of Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 11, 4095–4104. Oslo
- [50] Strahler A. and A. Strahler 1998: *Introducing Physical Geography*. John Wiley & Sons Inc. New York
- [51] Sutherland K. 2009: What can we expect from Copenhagen? *Filtration Industry Analyst*, Volume 2009, Issue 8, 5
- [52] Tipler P.A. und G. Mosca 2004: *Physik: für Wissenschaftler und Ingenieure*. Elsevier GmbH. München
- [53] Tonse S.R., N.J. Brown, R.A. Harley and L. Jin 2008: A process-analysis based study of the ozone weekend effect. *Atmospheric Environment*, 42 (2008), 7728–7736. USA
- [54] Warneck P. 2000: *Chemistry of the Natural Atmosphere*. Academic Press. San Diego, London

- [55] Wilke M. 2000: Basiswissen Chemie: Allgemeine Chemie, Anorganische Chemie, Organische Chemie, Technische Verfahren. Hirzel Verlag. Stuttgart
- [56] Wuebbles D.J. and K. Hayhoe 2002: Atmospheric methane and global change. Earth-Science Reviews 57 (2002), 177–210. Illinois
- [57] Yarwood G., J. Grant, B. Koo and A.M. Dunker 2008: Modeling weekday to weekend changes in emissions and ozon in the Los Angeles basin for 1997 and 2010. Atmosphere Environment, 42 (2008), 3765–3779. USA
- [58] [www.umweltbundesamt.at](http://www.umweltbundesamt.at) (Zugriff am 30.10.2009, 20.05.2010)
- [59] [www.statistik.at](http://www.statistik.at) (Zugriff am 09.08.2010)
- [60] [de.wikipedia.org](http://de.wikipedia.org) (Zugriff am 09.08.2010)
- [61] [maps.google.at](http://maps.google.at) (Zugriff am 15.09.2010)
- [62] [www.krustetten.at](http://www.krustetten.at) (Zugriff am 15.09.2010)
- [63] [www.oerok-atlas.at](http://www.oerok-atlas.at) (Zugriff am 11.01.2011)
- [64] [www.geodsz.com](http://www.geodsz.com) (Zugriff am 26.05.2011)
- [65] [www.libradtran.org](http://www.libradtran.org) (Zugriff am 02.08.2011)

## Abbildungsverzeichnis

1	Das elektromagnetische Spektrum [52]	3
2	Der vertikale Aufbau der Atmosphäre [34]	4
3	Das solare Strahlungsspektrum, gemessen an der Obergrenze der Erdatmosphäre (fett) und auf Meeresspiegelniveau [30]	5
4	Die 3 Prozesse der Strahlungsbeeinflussung [eigene Darstellung]	8
5	Die Absorption des solaren Spektrums in 11km Höhe (oben) und an der Erdoberfläche (unten) [6]	9
6	Die Strahlung der Sonne (5788K) und Erde (255K) [6]	11
7	Der schematische Strahlungshaushalt der Erde [64]	12
8	Strahlungsbeeinflussung durch Wolken [44] (rote Pfeile = kurzwellige Strahlung; blaue Pfeile = langwellige Strahlung; in $\text{Wm}^{-2}$ )	15
9	Klimawirksame Komponenten der Atmosphäre: ihr Strahlungsantrieb, räumliche Verteilung und Untersuchungsgrad [22]	18
10	Verschiedene Modellrechnungen des Strahlungsantriebs durch troposphärisches Ozon seit 1750 [22]	22
11	Schematische Darstellung des Unterschiedes der Tagesgänge von Werktagen (durchgezogene Linie) zu Wochenenden (gestrichelte Linie), auf Grund verstärkten Stoßverkehrs am Morgen [4]	29

13	Forsthof [58] . . . . .	32
12	Übersicht der ausgewählten Stationen [[63], verändert] . . . . .	33
14	Gänserndorf [58] . . . . .	34
15	Hainburg [58] . . . . .	34
16	Illmitz [58] . . . . .	35
17	Mistelbach [58] . . . . .	35
18	Pillersdorf [58] . . . . .	36
19	Schwechat [58] . . . . .	36
20	Stockerau [58] . . . . .	37
21	Wiener Neustadt [58] . . . . .	38
22	O <sub>3</sub> -Durchschnittskonzentrationen von 1999 bis 2008 . . . . .	41
23	O <sub>3</sub> -Durchschnittskonzentrationen von 1999 bis 2008 für die Monate April bis August . . . . .	42
24	Durchschnittstemperaturen von 1999 bis 2008 . . . . .	42
25	Durchschnittstemperaturen von 1999 bis 2008 für die Monate April bis August . . . . .	43
26	Der Jahresgang von Ozon an den untersuchten Stationen . . . . .	44
27	Der Temperaturjahresgang der untersuchten Stationen . . . . .	44
28	Der Tagesgang von Ozon an den untersuchten Stationen . . . . .	45
29	Der Tagesgang von Ozon an den untersuchten Stationen für die Monate April bis August . . . . .	46
30	Der Temperaturtagesgang der untersuchten Stationen . . . . .	47
31	Der Temperaturtagesgang der untersuchten Stationen für die Monate April bis August . . . . .	47
32	Ozonmittelwerte der einzelnen Wochentage der untersuchten Stationen . .	48
33	Ozonmittelwerte der einzelnen Wochentage der untersuchten Stationen für die Monate April bis August . . . . .	49
34	Temperaturmittelwerte der einzelnen Wochentage der untersuchten Sta- tionen . . . . .	50
35	Temperaturmittelwerte der einzelnen Wochentage der untersuchten Sta- tionen für die Monate April bis August . . . . .	51
36	Ozontagesgang der untersuchten Stationen für die Monate April bis Au- gust an Werktagen . . . . .	52
37	Ozontagesgang der untersuchten Stationen für die Monate April bis Au- gust an Wochenenden . . . . .	53
38	Temperaturtagesgang der untersuchten Stationen für die Monate April bis August an Werktagen . . . . .	54
39	Temperaturtagesgang der untersuchten Stationen für die Monate April bis August an Wochenenden . . . . .	55
40	Der mittlere Ozontagesgang der Station Schwechat in Ereigniswochen, bei einem Schwellenwert von 110 $\mu\text{gm}^{-3}$ , unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie) . . . . .	57

41	Der mittlere Ozontagesgang der Station Stockerau in Ereigniswochen, bei einem Schwellenwert von $110 \mu\text{gm}^{-3}$ , unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie) . . . . .	58
42	Der mittlere Ozontagesgang der Station Wiener Neustadt in Ereigniswochen, bei einem Schwellenwert von $110 \mu\text{gm}^{-3}$ , unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie) . . . .	58
43	Der mittlere Ozontagesgang der signifikanten Station Forsthof in Ereigniswochen, bei einem Schwellenwert von $120 \mu\text{gm}^{-3}$ , unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie) .	60
44	Der mittlere Ozontagesgang der signifikanten Station Forsthof in Ereigniswochen, bei einem Schwellenwert von $140 \mu\text{gm}^{-3}$ , unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie) .	60
45	Der mittlere Ozontagesgang der signifikanten Station Schwechat in Ereigniswochen, bei einem Schwellenwert von $120 \mu\text{gm}^{-3}$ , unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie) .	61
46	Der mittlere Ozontagesgang der signifikanten Station Pillersdorf in Ereigniswochen, bei einem Schwellenwert von $130 \mu\text{gm}^{-3}$ , unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie) .	61
47	Die Veränderung des p-Wertes mit steigendem Schwellenwert bei Ereigniswochen von Ozon [eigene Darstellung] . . . . .	62
48	Die Veränderung des p-Wertes mit steigendem Schwellenwert bei normalen Wochen von Ozon [eigene Darstellung] . . . . .	63
49	Die mittleren Temperaturtagesgänge der Station Wiener Neustadt an Ereigniswoche, unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie) . . . . .	65
50	Der mittlere Temperaturtagesgang der signifikanten Station Forsthof in Ereigniswochen, bei einem Schwellenwert von $140 \mu\text{gm}^{-3}$ , unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie) . . . . .	67
51	Der mittlere Temperaturtagesgang der signifikanten Station Forsthof in normalen Wochen, bei einem Schwellenwert von $80 \mu\text{gm}^{-3}$ , unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie) . . . . .	67
52	Der mittlere Temperaturtagesgang der signifikanten Station Forsthof in normalen Wochen, bei einem Schwellenwert von $90 \mu\text{gm}^{-3}$ , unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie) . . . . .	68
53	Der mittlere Temperaturtagesgang der signifikanten Station Illmitz in Ereigniswochen, bei einem Schwellenwert von $120 \mu\text{gm}^{-3}$ , unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie) . . . . .	68

54	Der mittlere Temperaturtagesgang der signifikanten Station Pillersdorf in Ereigniswochen, bei einem Schwellenwert von $130 \mu\text{gm}^{-3}$ , unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie) . . . . .	69
55	Der mittlere Temperaturtagesgang der signifikanten Station Pillersdorf in normalen Wochen, bei einem Schwellenwert von $80 \mu\text{gm}^{-3}$ , unterschieden nach Werktagen (durchgezogene Linie) und Wochenenden (gestrichelte Linie) . . . . .	69
56	Die Veränderung des p-Wertes mit steigendem Schwellenwert bei Ereigniswochen der Temperatur [eigene Darstellung] . . . . .	70
57	Die Veränderung des p-Wertes mit steigendem Schwellenwert bei normalen Wochen der Temperatur [eigene Darstellung] . . . . .	71

## Tabellenverzeichnis

1	Albedowerte verschiedener Oberflächen [11] . . . . .	7
2	Aerosolquellen [7] . . . . .	16
3	Konzentrationen und anthropogener Strahlungsantrieb von $\text{CO}_2$ , $\text{CH}_4$ und $\text{N}_2\text{O}$ [22] . . . . .	19
4	Mittlerer Strahlungsantrieb des troposphärischen Ozons in $\text{Wm}^{-2}$ seit der vorindustriellen Zeit, berechnet mit dem 2-D-Modell des U.K. Meteorological Office (UKMO) sowie dem Cambridge 2-D-Modell (CAMB) [20] . . . . .	22
5	Die Limits der Schwellenwerte der untersuchten Stationen . . . . .	39
6	Statistische Parameter der Ozondaten der untersuchten Stationen . . . . .	56
7	Maximale Ozondifferenz ( $\mu\text{gm}^{-3}$ ) von Werktagen und Wochenenden der untersuchten Stationen, nach Ereigniswochen (exc) und normalen Wochen (nex) unterschieden (Wochenende minus Werktag) . . . . .	59
8	Statistische Parameter der Temperaturdaten der untersuchten Stationen . . . . .	64
9	Maximale Temperaturdifferenz ( $^{\circ}\text{C}$ ) der Werktags- und Wochenendwerte der untersuchten Stationen, nach Ereigniswochen (exc) und normalen Wochen (nex) unterschieden . . . . .	66
10	Relative Temperaturamplituden ( $^{\circ}\text{C}$ ) der untersuchten Stationen, nach Werktagen (wd) und Wochenenden (we) unterschieden . . . . .	73
11	Ergebnisse der Berechnungen mit dem Strahlungsmodell „libRadtran“ [37, 65] in $\text{Wm}^{-2}$ . . . . .	74
12	Statistische Ergebnisse von Ozon ( $\text{O}_3$ ) und Temperatur (T), unterschieden nach unterschiedlichen Schwellenwerten (SW [ $\mu\text{gm}^{-3}$ ]) sowie Ereigniswochen (exc) und normale Wochen (nex) bzw. Werktagen (wd) und Wochenenden (we) . . . . .	78



# Lebenslauf

## *Persönliche Daten*

<b>Vor- und Zuname</b>	Rita Sturmlechner
<b>Adresse</b>	Großberg 2 3281 Oberndorf Tel: 0650/7421992 Email: rita.sturmlechner@gmx.at
<b>Geburtsdatum</b>	24.10.1984
<b>Nationalität</b>	Österreich
<b>Familienstand</b>	ledig

## *Ausbildung*

<b>Studium</b>	seit 2007	Theoretische und Angewandte Geographie
	2004 bis 2007	Geographie und Regionalplanung (Grundstudium)
	2003 bis 2005	Romanistik (Spanisch) - nicht abgeschlossen
<b>Schulbildung</b>	1999 bis 2003	BORG Scheibbs
	1995 bis 1999	HS Oberndorf
	1991 bis 1995	VS Oberndorf

## *Berufspraxis*

<b>Bundesamt für Wasserwirtschaft</b>	02/2011 bis 05/2011	Petzenkirchen	Werkvertrag „Hydrologische Bodenkenndaten Niederösterreich“
<b>Bundesamt für Wasserwirtschaft</b>	09/2010 bis 12/2010	Petzenkirchen	Werkvertrag „Erstellung von ProgrammROUTINEN zur Datenauswertung für die Messstation Parsivel im Einzugsgebiet Seitengraben“
<b>Bundesamt für Wasserwirtschaft</b>	04/2010 bis 06/2010	Petzenkirchen	Werkvertrag „Kartierungsarbeiten im Einzugsgebiet der Antiesen“

<b>EMPA Dübendorf</b>	04/2009 bis 05/2009	Zürich (Schweiz)	Mitarbeiter am Institut für Luftfremdstoffe und Umwelt- technik
<b>Metro Cash and Carry GmbH</b>	09/2007 bis 09/2007	St. Pölten	Kundendienst

### *Außeruniversitäres Engagement*

<b>Union Tischtennis- verein Raiffeisen Oberndorf</b>	seit 1990	aktives Mitglied, Trainerin, Mannschafts- führerin
---	-----------	---

### *Besondere Kenntnisse*

<b>PC-Kenntnisse</b>	Windows	sehr gut
	Microsoft Office	sehr gut
	WWW	sehr gut
	ArcGIS	gut
	R	gut
	Latex	gut
	Visual Studio	Grundkenntnisse
<b>Sprachen</b>	Deutsch	Muttersprache
	Englisch	sehr gut in Schrift und Sprache
	Spanisch	Grundkenntnisse in Schrift und Sprache
	Französisch	Anfänger
<b>Sonstiges</b>	Laborkenntnisse	im Rahmen des Studiums
	Führerschein B	seit November 2001
	10-Finger-System	sehr gut

### *Interessen*

<b>Sport</b>	Tischtennis, Schwimmen, Laufen, Radfahren
<b>Musik</b>	Klavier, Gitarre, Gesang